



**TUGAS AKHIR - TM 091585**

**STUDI EKSPERIMEN ALIRAN MELALUI  
*SQUARE DUCT* DAN *SQUARE ELBOW 90°*  
DENGAN VARIASI BUKAAN *DAMPER* GANDA**

WAHYU INDRAWAN  
NRP 2114 105 009

Dosen Pembimbing  
Dr. Wawan Aries Widodo ST, MT

PROGRAM SARJANA  
LABORATORIUM MEKANIKA FLUIDA  
JURUSAN TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA 2016



**FINAL PROJECT - TM 091585**

**AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE AIR FLOW  
PASSING THROUGH THE SQUARE DUCT AND  
THE SQUARE ELBOW 90° WITH DOUBLE DAMPER  
OPENING ANGLE VARIATIONS.**

**WAHYU INDRAWAN  
NRP 2114 105 009**

**Academic Advisor  
Dr. Wawan Aries Widodo ST, MT**

**BACHELOR DEGREE PROGRAM  
MECHANICAL FLUID LABORATORY  
MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT  
INDUSTRIAL TECHNOLOGY FACULTY  
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
SURABAYA 2016**

## LEMBAR PENGESAHAN

### STUDI EKSPERIMEN ALIRAN MELALUI *SQUARE DUCT* DAN *SQUARE ELBOW 90°* DENGAN VARIASI BUKAAN DAMPER GANDA

#### TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Mesin  
Pada  
Bidang Studi Konversi Energi  
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Oleh :

WAHYU INDRAWAN

NRP. 2114 105 009

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT.  
(NIP. 197104051997021001) ..... (Pembimbing)
2. Dr. Ir. Heru Mirmanto, MT.  
(NIP. 196202161995121001) ..... (Penguji 1)
3. Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D  
(NIP. 196412281990031002) ..... (Penguji 2)
4. Dedy Zulhidayat Noor, ST., MT., Ph.D  
(NIP. 197512062005011002) ..... (Penguji 3)

**SURABAYA 2016**

## **STUDI EKSPERIMEN ALIRAN MELALUI SQUARE DUCT DAN SQUARE ELBOW 90° DENGAN VARIASI SUDUT BUKAAN DAMPER GANDA**

**Nama Mahasiswa** : Wahyu Indrawan  
**NRP** : 2114 105 009  
**Jurusan** : Teknik Mesin  
**Dosen Pembimbing** : Dr. Wawan Aries Widodo, S.T, M.T

### **ABSTRAK**

Saluran udara memiliki peranan penting dalam mendistribusikan udara khususnya untuk proses industri. Saluran udara terdiri dari beberapa komponen yang terdiri dari saluran upstream, saluran downstream, sambungan (fitting), belokan (elbow 90°), dan katup (damper). Elbow 90° dan damper pada saluran udara akan menimbulkan koefisien losses dan pressure drop sepanjang aliran yang melewati pipa lurus.

Studi eksperimen menggunakan model uji berupa saluran udara square ducting dengan  $D_h=125\text{mm}$ . Pada bagian upstream memiliki panjang  $6D_h$  dan downstream memiliki panjang  $16D_h$ . Terpasang elbow 90° dengan radius ratio ( $r_m/D_h$ ) 1.5 dan damper ganda pada jarak  $x/D_h=2$  setelah elbow dengan dimensi masing – masing damper yaitu  $6.25\text{mm} \times 12.5\text{mm}$ . Udara masuk upstream dihisap oleh fan hisap dengan  $Re_{D_h}$   $7,88 \times 10^4$  untuk profil kecepatan dengan variasi sudut bukaan damper ganda 0°, sudut 30° bentuk nozzle dan bentuk diffusor. Pressure drop, koefisien losses elbow 90° dan koefisien losses damper menggunakan variasi  $Re_{D_h}$   $3,94 \times 10^4 < Re_{D_h} < 9.46 \times 10^4$  (kecepatan udara 5 m/s sampai 12 m/s) dengan variasi sudut bukaan double damper 0°, 10°, 20° dan 30° dengan masing – masing bukaan damper membentuk nozzle dan diffusor. Fenomena aliran fluida diambil pada downstream dengan jarak

*section sepanjang  $D_h$ . Variabel yang diukur adalah tekanan stagnasi dan tekanan statis.*

*Hasil studi eksperimen ini diperole proses recovery aliran pada sudut bukaan damper ganda  $30^\circ$  nozzle mengalami recovery lebih baik jika di banding variasi bukaan damper lainnya pada jarak  $16D_h$  dari outlet elbow  $90^\circ$ . Penempatan damper ganda dan elbow  $90^\circ$  mengakibatkan meningkatnya pressure drop yang dihasilkan dan dinyatakan dengan nilai pressure coefficient ( $C_p$ ). Nilai pressure coefficient terbesar pada variasi bukaan damper ganda  $30^\circ$  nozzle dan terendah pada variasi tanpa damper. Semakin meningkatnya Reynolds number, pressure coefficient pada setiap variasi juga meningkat. Perbandingan dilakukan antara bukaan sudut yang membentuk nozzle dan diffusor. Untuk nilai koefisien losses damper terbesar pada variasi bukaan damper ganda  $30^\circ$  nozzle dengan Reynolds number  $8.67 \times 10^4$  dengan nilai 3.878 sedangkan variasi bukaan damper ganda  $30^\circ$  diffusor memiliki nilai 3.702. Untuk koefisien losses elbow pada variasi bukaan nozzle memiliki trendline meningkat sedangkan pada variasi bukaan diffusor memiliki trendline menurun seiring dengan bertambah besarnya bukaan sudut damper ganda.*

***Kata kunci: Ducting, damper ganda, pressure drop, velocity profile***

**AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE AIR FLOW  
PASSING THROUGH THE SQUARE DUCT AND THE  
SQUARE ELBOW 90° WITH DOUBLE DAMPER  
OPENING ANGLE VARIATIONS.**

**Student' Name** : Wahyu Indrawan  
**Student ID Number** : 2114 105 009  
**Major** : Mechanical Engineering  
**Advisor** : Dr. Wawan Aries Widodo, S.T, M.T

**ABSTRACT**

On the ducting system installation, there are some components: upstream ducts, downstream ducts, fitting, bending (elbow 90), and damper. In fact, Elbow 90 and damper (valve) in the ducting system is to result in coefficient losses and pressure drop throughout the length of the flow going through the straight duct..

This study is carried out in experimental design using a rectangular ducting system test sample with  $D_h = 125\text{mm}$  diameter. The upstream straight channel part has  $6D_h$  of length and  $16D_h$  of length for the downstream straight channel. There installed elbow 90° with the ratio radius ( $r_m/D_h$ ) 1.5 and double damper that was installed on the  $x/D_h = 2$  after elbows with dimensions  $6.25\text{mm} \times 12.5\text{mm}$ . In brief, the incoming air in the upstream straight channel is sucked by induced fan with  $Re_{Dh} 7,88 \times 10^4$  for the velocity profile with an opening double damper angle variation which is 0°, 30° opening variation double damper (nozzle shape), 30° (diffusor shape). Pressure drop, coefficient losses elbow 90°, and variation-based coefficient loss damper  $Re_{Dh} 3,94 \times 10^4 < Re_{Dh} < 10^5$  some variation openings on the double damper 0°, 10°, 20° dan 30° in which each of the damper openings forms nozzle and diffusor. The measured variables were stagnation pressure and static pressure on downstream straight channel with the section distance of along  $D_h$

The results of this study the flow recovery process on the double damper opening angle  $30^\circ$  (nozzle) experienced better recovery than the non-opening variation, the double damper opening angles  $0^\circ$ , dan  $30^\circ$ , the diffuser that occurs upon  $16D_h$  of distance from elbow  $90^\circ$  outlet. The biggest value of pressure coefficient was obtained from the double damper opening variation  $30^\circ$  (nozzle). Consequently, damper coefficient losses and elbow  $90^\circ$  coefficient losses on the nozzle-shaped variation generated bigger value. The biggest value of the damper coefficient losses on nozzle double damper opening variation  $30^\circ$  with Reynolds number  $8.67 \times 10^4$  and 3878 value. On the other hand, the elbow coefficient losses on the nozzle opening variation has an increasing trendline. A decrease trendline in response to the increase of the double damper angle opening.

**Keywords: Ducting, Pressure Drop, Velocity Profile, Double Damper**

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL .....	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
ABSTRAK .....	iv
ABSTRACT.....	vi
KATA PENGANTAR.....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR TABEL.....	xv
DAFTAR SIMBOL .....	xvi

## BAB I PENDAHULUAN .....1

1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	4
1.3 Batasan Masalah.....	5
1.4 Tujuan Penelitian.....	5
1.5 Manfaat Penelitian.....	6

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....7

2.1 Aliran Fluida Dalam Pipa.....	7
2.1.1 Aliran Laminar dan Turbulen dalam Pipa .....	7
2.2 Separasi Aliran .....	9
2.2.1 Separasi aliran di dalam <i>elbow</i> 90°.....	10
2.2.2 Mekanisme terjadinya <i>Secondary flow</i> di dalam <i>elbow</i> 90°.....	12
2.3 Persamaan <i>Euler</i> dalam Koordinat <i>Streamline</i> .....	12
2.4 Tekanan <i>Statis</i> , <i>Stagnasi</i> , dan <i>Dinamis</i> .....	13
2.5 Karakteristik aliran yang Melewati Saluran dengan <i>Butterfly Valve</i> sebagai Body pengganggu .....	19
2.6 Karakteristik aliran melalui <i>Square Duct</i> dengan <i>Elbow</i> 90° .....	21
2.7 <i>Pressure Loss Coefficient</i> pada <i>Ducting</i> yang dilengkapi dengan <i>Butterfly Valve</i> dengan variasi bukaan sudut dan variasi <i>Reynolds Number</i> .....	23
2.8 Terowongan Angin ( <i>windtunnel</i> ).....	26



<b>BAB III METODOLOGI .....</b>	<b>27</b>
3.1 Skema Penelitian .....	27
3.2 Komponen Utama dan Alat ukur .....	28
3.2.1 Square Ducting .....	28
3.2.2 Centrifugal Fan .....	29
3.2.3 Honey Comb, Screen dan Nozzle .....	30
3.2.4 <i>Damper</i> .....	31
3.2.5 Alat Ukur.....	32
3.3 Analisa Dimensi Parameter-Parameter yang dianalisa .....	35
3.3.1 Analisa Grup Tak Berdimensi untuk <i>Pressure Drop</i> pada <i>Square Ducting</i> .....	36
3.3.2 Analisa Grup Tak Berdimensi untuk Kecepatan pada <i>Square Ducting</i> .....	38
3.4 Langkah-Langkah Validasi.....	41
3.4.1 Alat yang digunakan.....	41
3.4.2 Validasi Tekanan Dinamis .....	41
3.4.3 Validasi Tekanan Dinding .....	41
3.5 Prosedur Pengambilan Data.....	42
3.5.1 Pengambilan Data Kuantitatif .....	42
3.5.2 Pengolahan Data Kuantitatif.....	43
3.6 Urutan Langkah Penelitian .....	51
3.7 Langkah Pengambilan Data.....	52
3.7.1 Langkah pengambilan data profil kecepatan .....	52
3.7.2 Langkah pengambilan data <i>pressure drop</i> .....	54
3.7.3 Langkah pengambilan data <i>koefisien losses damper</i> .....	55
3.7.4 Langkah pengambilan data <i>koefisien losses elbow 90°</i> .....	56

<b>BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>59</b>
4.1 Perbandingan Profil Kecepatan Bidang Horizontal dan Vertikal pada Sisi <i>Inlet Upstream Straight Channel</i> $Re_{Dh} = 7,88 \times 10^4$ .....	60
4.2 Perbandingan Profil Kecepatan Bidang Horizontal dan Vertikal Tanpa <i>Damper</i> dengan Sudut Buka <i>Damper</i> Ganda $0^\circ$ $Re_{Dh} = 7,88 \times 10^4$ .....	62
4.3 Perbandingan Profil Kecepatan Bidang Horizontal dan Vertikal Tanpa <i>Damper</i> dengan Sudut Buka <i>Damper</i> Ganda $30^\circ$ membentuk <i>Diffusor</i> $Re_{Dh} = 7,88 \times 10^4$ .....	65
4.4 Perbandingan Profil Kecepatan Bidang Horizontal dan Vertikal Tanpa <i>Damper</i> dengan Sudut Buka <i>Damper</i> Ganda $30^\circ$ membentuk <i>Nozzle</i> $Re_{Dh} = 7,88 \times 10^4$ .....	71
4.5 Perbandingan Profil Kecepatan Bidang Horizontal dan Vertikal Tanpa <i>Damper</i> dengan Sudut Buka <i>Damper</i> Ganda $0^\circ$ , Sudut Buka <i>Damper</i> Ganda $30^\circ$ <i>Nozzle</i> dan Sudut Buka <i>Damper</i> Ganda $30^\circ$ <i>Diffusor</i> $Re_{Dh} = 7,88 \times 10^4$ .....	76
4.6 <i>Pressure Drop</i> .....	88
4.6.1 <i>Koefisien Losses Damper</i> .....	91
4.6.2 <i>Koefisien Losses Elbow <math>90^\circ</math></i> .....	96
 <b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....</b>	 <b>101</b>
5.1 Kesimpulan .....	101
5.2 Saran .....	102
 <b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	 <b>103</b>
<b>LAMPIRAN .....</b>	<b>105</b>

## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Lokasi perhitungan profil kecepatan .....	30
Tabel 3.2 Urutan langkah penelitian.....	44
Tabel 3.3 Langkah pengambilan data profil kecepatan .....	45
Tabel 3.4 Langkah pengambilan data <i>pressure drop</i> .....	46
Tabel 3.5 Langkah pengambilan <i>koefisien losses damper</i> ...	47
Tabel 3.6 Langkah pengambilan <i>koefisien losses elbow 90°</i> .....	48
Tabel 3.7 Jadwal pelaksanaan penelitian.....	49

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Percobaan Reynold tentang Aliran laminar (a) dan aliran turbulen (b) (Fatih 2012) .....	9
Gambar 2.2 Separasi lapisan batas (Nakayama: 1999 ) .....	9
Gambar 2.3 Separasi aliran pada <i>curved pipe</i> (Cheng, 1994) .....	12
Gambar 2.4 <i>Secondary flow</i> (Miller, 1990) .....	13
Gambar 2.5 Gerakan partikel fluida di sepanjang streamline .....	14
Gambar 2.6 Pengukuran tekanan statis (Fox and McDonald's, 8 <sup>th</sup> edition) .....	16
Gambar 2.7 Pengukuran tekanan stagnasi .....	18
Gambar 2.8 Pengukuran Tekanan Stagnasi dan Tekanan Statis .	18
Gambar 2.9. <i>Test Section</i> serta posisi <i>valve</i> $x/D=1$ dan sudut $\alpha$ (Danbon dan Sollicec : 2000 ) .....	19
Gambar 2.10. Profil kecepatan dan intensitas turbulen pada medan aliran pada sudut $\alpha=0^\circ$ dengan <i>elbow</i> (Danbon dan Sollicec : 2000 ) .....	20
Gambar 2.11 Profil kecepatan dan intensitas turbulen pada medan aliran pada sudut $\alpha=30^\circ$ dengan <i>elbow</i> (Danbon dan Sollicec : 2000) .....	20
Gambar 2.12 a) Posisi pengambilan data pada <i>domain</i> uji .....	21
b) Mesh pada <i>Volume</i> (Rup dan Sarna : 2011) .....	21
Gambar 2.13 Perbandingan profil kecepatan didapat dari simulasi dan eksperimen untuk $\theta = 60^\circ$ ( $z/D_h = 0.0$ ) (Rup dan Sarna : 2011) .....	22
Gambar 2.14 Perbandingan profil kecepatan didapat dari simulasi dan eksperimen untuk $x/D_h = 1.0$ and $z/D_h = 0.0$ (Rup dan Sarna : 2011) .....	22
Gambar 2.15 Perbandingan koefisien tekanan pada kedua sisi <i>inner</i> dan <i>outer wall elbow</i> hasil simulasi dan eksperimen (Rup dan Sarna : 2011) .....	23
Gambar 2.16 Peralatan yang digunakan pada studi eksperimen yang dilakukan Kimura (1995) .....	24
Gambar 2.17 (a) Hasil dari pressure loss coefficient terhadap variasi Reynolds number dan .....	25

(b) Hasil dari pressure loss coefficient variasi terhadap bukaan sudut katup yang digunakan ...	26
Gambar 2.18 <i>Open circuit windtunnel</i> ( <a href="http://www.ustudy.in">www.ustudy.in</a> ).....	23
Gambar 3.1 Skema instalasi penelitian.....	28
Gambar 3.2 <i>Square Ducting</i> .....	29
Gambar 3.3 <i>Centrifugal Fan</i> .....	30
Gambar 3.4 <i>Honey Comb dan Nozzle</i> .....	30
Gambar 3.5 Bentuk <i>Double Damper</i> saat dilepas dari instalasi ..	31
Gambar 3.6 <i>Double Damper</i> (a) sudut $30^0$ <i>nozzle</i> .....	31
(b) sudut $30^0$ <i>diffusor</i> .....	31
Gambar 3.7 Posisi <i>double damper</i> pada instalasi .....	32
Gambar 3.8 <i>Pitot Tube</i> .....	33
Gambar 3.9 Lokasi perhitungan untuk profil kecepatan .....	34
Gambar 3.10 <i>Inclined Manometer</i> .....	35
Gambar 3.11 Lokasi perhitungan <i>pressure drop</i> .....	46
Gambar 3.12 Lokasi perhitungan <i>koefisien losses elbow <math>90^0</math></i> ....	47
Gambar 3.13 Lokasi perhitungan <i>koefisien losses damper</i> .....	48
Gambar 3.14 <i>Fluktuasi kecepatan pada inlet upstream</i> .....	50
Gambar 4.1 Grafik <i>velocity profile</i> (a) bidang horizontal sisi <i>upstream</i> .....	61
(b) bidang vertikal sisi <i>upstream</i> .....	61
Gambar 4.2 Distribusi profil kecepatan bidang horizontal pada <i>downstream straight channel</i> tanpa <i>damper</i> dan sudut <i>damper</i> ganda $0^0$ .....	63
Gambar 4.3 Distribusi profil kecepatan bidang vertikal pada <i>downstream straight channel</i> tanpa <i>damper</i> dan sudut <i>damper</i> ganda $0^0$ .....	63
Gambar 4.4 Distribusi profil kecepatan bidang horizontal pada <i>downstream straight channel</i> tanpa <i>damper</i> dan sudut <i>damper</i> ganda $30^0$ <i>diffusor</i> .....	66
Gambar 4.5 Distribusi profil kecepatan bidang vertikal pada <i>downstream straight channel</i> tanpa <i>damper</i> dan sudut <i>damper</i> ganda $30^0$ <i>diffusor</i> .....	66

Gambar 4.6	Distribusi profil kecepatan bidang horizontal pada <i>downstream straight channel</i> tanpa <i>damper</i> dan sudut <i>damper</i> ganda 30° <i>nozzle</i> .....	72
Gambar 4.7	Distribusi profil kecepatan bidang vertikal pada <i>downstream straight channel</i> tanpa <i>damper</i> dan sudut <i>damper</i> ganda 30° <i>nozzle</i> .....	72
Gambar 4.8	Grafik <i>velocity profile</i> bidang vertikal pada posisi <i>cross-section</i> berdasarkan <i>test section</i> : a) -2; b) -1; c) 1; d) 2; e) 3; f) 10 ;g) 13; h) 14.....	78
Gambar 4.9	Grafik <i>velocity profile</i> bidang horizontal pada posisi <i>cross-section</i> berdasarkan <i>test section</i> : a) -2; b) -1; c) 1; d) 2; e) 3; f) 10 ;g) 13; h) 14.....	83
Gambar 4.10	Grafik $C_p$ yang diperoleh pada variasi bukaan <i>damper</i> ganda yang membentuk <i>nozzle</i> dan <i>diffusor</i> pada variasi <i>Reynolds number</i> $3,94 \times 10^4 < Re_{Dh} < 10^5$ .....	89
Gambar 4.11	<i>Koefisien losses damper</i> dengan variasi sudut bukaan <i>damper</i> 0°,10°,20° dan 30° membentuk <i>nozzle</i> .....	92
Gambar 4.12	<i>Koefisien losses damper</i> dengan variasi sudut bukaan <i>damper</i> 0°,10°,20° dan 30° membentuk <i>diffusor</i> .....	93
Gambar 4.13	<i>Koefisien losses elbow 90°</i> variasi sudut bukaan <i>damper</i> 0°,10°,20° dan 30° <i>diffusor</i> .....	97
Gambar 4.14	<i>Koefisien losses elbow 90°</i> variasi sudut bukaan <i>damper</i> 0°,10°,20° dan 30° <i>nozzle</i> .....	98

## DAFTAR SIMBOL

$\Delta p$	: perbedaan tekanan statis lokal dan referensi (N/m <sup>2</sup> )
$C_p$	: <i>pressure coefficient</i>
$\rho$	: massa jenis fluida (kg/m <sup>3</sup> )
$\mu$	: viskositas absolut fluida (kg/(m.s))
$U_{ref}$	: kecepatan <i>freestream</i> di <i>inlet upstream straight channel</i> (m/s)
$u$	: kecepatan lokal (m/s)
$a$	: tinggi <i>damper</i> (m)
$b$	: lebar <i>damper</i> (m)
$r_m$	: mean radius <i>elbow 90°</i> (m)
$r_i$	: <i>inner radius elbow 90°</i> (m)
$r_o$	: <i>outer radius elbow 90°</i> (m)
$l_i$	: panjang total <i>inner</i> searah <i>streamline elbow 90°</i> (m)
$l_o$	: panjang total <i>outer</i> searah <i>streamline elbow 90°</i> (m)
$D_h$	: diameter hidrolik saluran (m)
$L_i$	: panjang <i>upstream straight channel</i> (m)
$L_o$	: panjang <i>downstream straight channel</i> (m)
$x$	: jarak <i>damper</i> dari output <i>elbow 90°</i> (m)
$\theta$	: sudut pembukaan <i>damper</i>
$Re_{Dh}$	: <i>Reynolds Number</i>
$m$	: massa (kg)
$\nabla$	: volume (m <sup>3</sup> )
$\rho$	: massa jenis (kg/m <sup>3</sup> )
$M$	: bilangan <i>Mach</i>
$\bar{V}$	: Kecepatan rata-rata aliran (m/s)
$c$	: Kecepatan rambat bunyi lokal (m/s)

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Udara adalah fluida yang dapat mengalir atau bergerak dari suatu tempat ke tempat yang lain. Modern ini peranan udara sangat penting sebagai media pendingin atau sebagai campuran dalam proses pembakaran yang memerlukan udara. Untuk mengalirkan udara dari tempat yang satu ke tempat yang lain diperlukan suatu instalasi sebagai transportasi udara tersebut. Instalasi sistem saluran udara memiliki peranan penting agar udara dapat disalurkan dengan maksimal dan tepat sasaran sesuai dengan kebutuhan. Pada sistem perindustrian dan power plant sistem saluran udara sangat berpengaruh pada kelancaran proses produksi karena udara tidak akan tersalurkan tanpa adanya instalasi saluran udara sebagai alat distribusi. Oleh sebab itu bentuk dan komponen pada instalasi saluran udara sangat mempengaruhi kecepatan, tekanan dan efisiensi dari distribusi udara tersebut. Pada instalasi sistem saluran udara terdapat beberapa komponen yang terdiri dari saluran *upstream*, saluran *downstream*, sambungan (*fitting*), belokan (*elbow 90°*), dan katup (*damper*). Sambungan pada sistem saluran udara terdapat antara saluran *upstream* dan *downstream* yang digunakan untuk menyambungkan antara saluran tersebut. Katup digunakan untuk mengatur debit aliran udara di dalam saluran sesuai dengan kebutuhan. *Elbow 90°* merupakan komponen berupa lengkungan atau belokan yang membentuk sudut  $90^\circ$  yang mempunyai koefisien *losses* dan menyebabkan *pressure drop* sepanjang aliran.

*Pressure drop* yang terjadi pada saat aliran melewati elbow  $90^\circ$  lebih besar daripada pada saat aliran melintasi instalasi lurus dengan kecepatan *freestream* yang sama. Hal tersebut dikarenakan aliran yang mengalir pada *elbow* mengalami kerugian akibat gesekan (*friction loss*) seperti halnya pada aliran



yang mengalir dalam instalasi lurus dan juga mengalami kerugian akibat separasi (*separation loss*) dan *secondary flow*. Separasi terjadi akibat perubahan arah aliran fluida yang melalui saluran tersebut sehingga aliran tidak mampu melawan *adverse pressure gradient* yang mengakibatkan aliran akan terpisah dan berbalik arah (*back flow*) dari aliran utamanya dan membentuk *vortex*. Pada *square elbow 90°*, *secondary flow* terjadi akibat perbedaan distribusi tekanan sisi *inner* dan *outer wall elbow 90°*.

*Secondary flow* terjadi karena distribusi tekanan pada sisi *outer wall* lebih besar daripada sisi *inner wall*, dan hal ini memungkinkan partikel fluida bergerak dari *outer wall* menuju *inner wall*. *Inner wall* adalah sisi dari pada *elbow 90°* yang memiliki radius yang kecil sedangkan *outer wall* adalah sisi dari pada *elbow 90°* memiliki radius besar. Adanya gerakan partikel ini menyebabkan laju aliran fluida terhambat. Adanya separasi dan *secondary flow* memberikan kontribusi yang besar dalam menimbulkan *pressure drop* aliran. Secara tidak langsung *pressure drop* dapat mengurangi head aliran, sehingga daya yang dibutuhkan oleh instalasi seperti pada pompa, kompresor, dan blower akan meningkat. Oleh karena itu usaha untuk mengurangi besarnya *pressure drop* menjadi hal yang sangat penting.

Penempatan penghalang atau katup (*damper*) pada sistem perpipaan juga sangat berpengaruh pada fenomena aliran yang terjadi. Dengan adanya *damper* maka aliran pada fluida akan mengalami gangguan dan akan terpecah setelah melewati *damper*. Untuk *pressure drop* yang terjadi pada asesoris tambahan suatu instalasi juga akan berpengaruh pada aliran di dalamnya, bergantung pada variasi bukaan sudut *damper* dan variasi bentuk bukaan *damper* yang dilakukan. *Damper* yang dibuka secara penuh (*fully open*) akan memberikan nilai koefisien dan *pressure drop* yang berbeda dengan *damper* yang dibuka 30°. Model bukaan *damper* juga akan mempengaruhi nilai koefisien dan fenomena aliran yang terjadi. Oleh karena itu akan dilakukan studi eksperimen dan pengamatan fenomena aliran serta *pressure*

*drop* yang terjadi pada bukaan *damper* yang berbentuk *nozzle* dan *diffuser* dengan masing – masing bukaan sudut  $30^0$ .

Beberapa penelitian terdahulu mengenai aliran melintasi bodi pengganggu (*damper*) telah banyak dilakukan. **Kimura dkk.(1995)** melakukan studi eksperimen untuk menghitung *pressure loss* dan kavitasi yang terjadi pada *ducting* yang menggunakan *butterfly valve* dimana pada studi eksperimen ini menggunakan fluida air. Studi eksperimen dilakukan untuk membandingkan *pressure loss* dari *flat valve* yang di kombinasikan dengan 3 macam tumpukan *butterfly valve* yang digunakan yaitu tipe *round hub*, tipe *square hub* dan tipe *round hub split*. Saluran yang dapat digunakan pada studi eksperimen memiliki penampang *circular* dan penampang bujursangkar (terdapat 2 *ducting*) dengan diameter 50 mm hingga 100 mm. Variasi yang digunakan adalah bukaan dari *butterfly valve* dari sudut  $10^0$  hingga  $90^0$  (*fully open*) dan juga *Reynolds number* dari  $7 \times 10^3 < Re < 5 \times 10^5$  dengan maksimum kecepatan 10 m/s. Hasil yang didapatkan adalah berupa grafik *pressure loss coefficient* fungsi *Reynolds number*. Apabila terjadi kenaikan *Reynolds number* maka *pressure loss coefficient* mengalami penurunan dan variasi bukaan *butterfly valve* juga mempengaruhi *pressure loss coefficient* yang dihasilkan

**Danbon dan Sollic** (2000) melakukan eksperimen pada pipa lurus yang diganggu oleh *butterfly valve*. Pipa tersebut memiliki diameter 0,3 m dan panjang 11D . Pengambilan data dilakukan pada bilangan *Reynolds* yang bervariasi rentangnya  $5.0 \times 10^4 < Re < 10^6$ , dilakukan dengan tambahan *elbow 90^0* dan *butterfly valve* yang di-*setting* kemiringan  $0^0$  (*fully open*) dan  $30^0$ . Hasil yang didapat melalui grafik profil kecepatan pada pipa lurus yang terdapat *valve* bahwa aliran akan mencapai *fully developed* lebih awal dari pada pipa lurus yang ditambahkan *elbow 90^0*, hal ini disebabkan karena pada *elbow 90^0* tersebut sudah terjadi aliran sekunder sebelum melalui *damper*.

Dari beberapa penelitian diatas dilakukan penelitian lebih lanjut tentang karakteristik aliran melewati saluran seperti yang

dilakukan dan **Danbon & Sollicec (2000)** dan **Rup & Sarna (2011)** yaitu saluran yang akan dipasang *elbow 90°* dan *butterfly valve* pada sisi *inlet*. Penelitian dilakukan menggunakan metoda komputasi pada bilangan Reynolds,  $5 \times 10^5$ ,  $6 \times 10^5$ ,  $7 \times 10^5$ ,  $8 \times 10^5$ , ,  $9 \times 10^5$  valve diletakkan pada rasio jarak  $x/D = 2$  saat bukaan valve  $0^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $20^\circ$ , dan  $30^\circ$  dipasang menggunakan *elbow 90°* dan tanpa *elbow 90°*. Hasil yang diamati berupa profil kecepatan, koefisien *losses*, dan visualisasi aliran.

## 1.2. Rumusan Masalah

Suatu aliran yang mengalir didalam saluran udara akan mengalami *pressure drop*. *Pressure drop* ini dikarenakan karena adanya *friction loss* dan *separation loss*. Oleh karena itu perlu dilakukan pengamatan lebih lanjut tentang *pressure drop* dalam komponen saluran udara yang terdiri atas *upstream straight channel*, *square-sectioned elbow 90°*, dan *downstream straight channel*. Sehingga didapat konstruksi yang sesuai dengan mengurangi kerugian energi yang terjadi dalam suatu saluran udara.

Dengan dipasangnya damper setelah *elbow 90°* diharapkan adanya perubahan profil kecepatan dan dapat mempengaruhi nilai *pressure drop* yang terjadi. Untuk mengamati hal tersebut maka dirumuskanlah :

1. Bagaimana *pressure drop* pada saluran *square ducting* , koefisien *loss elbow 90°* dan koefisien *loss pada damper ganda* ?
2. Bagaimana profil kecepatan aliran pada daerah *downstream dan upstream duct* pada posisi bidang *horizontal dan vertikal* ?

### 1.3. Batasan Masalah

Batasan masalah diberikan agar pembahasan sesuai dengan tujuan penelitian. Batasan masalah yang digunakan pada penelitian ini adalah :

1. Fluida kerja adalah udara dengan profil kecepatan udara uniform pada sisi inlet dengan sifat *incompressible*, *viscous* dan *steady*.
2. Perpindahan panas akibat gesekan antara udara dengan dinding diabaikan.
3. Kekasaran dinding diabaikan.
4. Aliran yang melintasi saluran udara memiliki lapis batas turbulen
5. Temperatur udara di dalam ruangan diasumsikan konstan
6. Kecepatan udara masuk *upstream duct* pada  $Re_{Dh} 7,88 \times 10^4$  untuk mengukur profil kecepatan dan *pressure drop*, koefisien *loss elbow*  $90^\circ$  dan koefisien *loss damper* pada *Reynolds number*  $3,94 \times 10^4 \leq Re_{Dh} \leq 9,46 \times 10^4$  (kecepatan udara 5 m/s sampai 12 m/s dengan kenaikan kecepatan 1 m/s)

### 1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan dilakukan studi eksperimen ini yaitu untuk mengetahui fenomena aliran yang terjadi setelah melalui gangguan (*damper*) yang diletakkan pada jarak  $2D_h$  dari saluran outlet *elbow*  $90^\circ$  pada saluran *downstream* dan tujuan khusus dari penelitian ini sebagai berikut :

1. Mengetahui *pressure drop*, koefisien *loss elbow*  $90^\circ$  dan koefisien *loss damper* ganda dengan variasi kecepatan 5,6,7,8,9,10,11 dan 12 m/s atau pada rentang *Reynolds number*  $3,94 \times 10^4 \leq Re_{Dh} \leq 9,46 \times 10^4$
2. Mengetahui profil kecepatan pada *upstream* dan *downstream duct* pada posisi bidang *horizontal* dan *vertikal* dengan kecepatan masuk 10 m/s pada variasi bukaan sudut damper ganda.

### 1.5. Manfaat Penelitian

Manfaat yang akan didapat setelah melakukan penelitian ini sebagai berikut :

1. Memberikan gambaran tentang fenomena aliran yang melewati suatu saluran berpenampang bujursangkar (square duct) yang diletakkan dua buah *Damper* pada saluran *downstream straight channel* yang diambil pada posisi *horizontal section* dan posisi *vertikal section*, *pressure drop*, *koefisien loss elbow 90°* dan *koefisien loss damper*.
2. Memberikan penjelasan tentang pengaruh variasi sudut pembukaan dua buah *Damper* yang berbentuk *nozzle* dan *diffusor* terhadap karakteristik aliran sepanjang *downstream straight channel*

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Aliran Fluida Dalam Pipa**

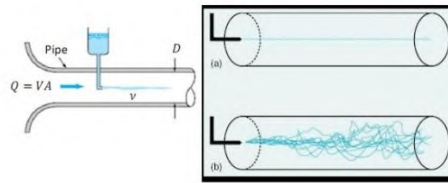
Fluida yang bergerak dapat diklasifikasikan ke dalam beberapa katagori yaitu fluida yang memiliki aliran *steady* atau tidak *steady*. Jika fluidanya *steady*, kecepatan partikel fluida pada setiap titik tetap terhadap waktu. Fluida pada berbagai bagian dapat mengalir dengan laju atau kecepatan yang berbeda, tetapi fluida pada satu lokasi selalu mengalir dengan laju atau kecepatan yang tetap. Fluida *incompressibel* adalah suatu fluida yang tak dapat dimampatkan. Sebagian besar cairan dapat dikatakan sebagai *incompressibel*. Sedangkan untuk fluida *viscous* adalah fluida yang tidak mengalir dengan mudah, seperti madu dan aspal. Fluida *viscous* dapat diartikan fluida yang memiliki kekentalan sehingga menyebabkan tegangan geser pada saat mengalir dan menghambat laju aliran tersebut. Selain itu fluida yang mengalir juga dapat dilihat karakteristik alirannya dengan menghitung *Reynolds Number*. Dengan melihat nilai dari *Reynolds Number* fluida mengalir tersebut dapat dilihat apakah fluida tersebut laminar atau turbulen.

##### **2.1.1 Aliran Laminar dan Turbulen dalam Pipa**

Aliran fluida dapat dibedakan menjadi aliran laminar dan aliran turbulen, tergantung pada jenis garis aliran yang dihasilkan oleh partikel-partikel fluida. Jika aliran dari seluruh partikel fluida bergerak sepanjang garis yang sejajar dengan arah aliran (atau sejajar dengan garis tengah pipa, jika fluida mengalir di dalam pipa), fluida yang seperti ini dikatakan laminar. Fluida laminar kadang-kadang disebut dengan fluida *viscous* atau fluida garis alir (*streamline*). Kata laminar berasal dari bahasa latin lamina, yang berarti lapisan atau plat tipis. Sehingga, aliran laminar berarti aliran yang berlapis-lapis. Lapisan-lapisan fluida akan saling bertindihan satu sama lain tanpa bersilangan. Jika gerakan

partikel fluida tidak lagi sejajar, mulai saling bersilang satu sama lain sehingga terbentuk pusaran di dalam fluida, aliran yang seperti ini disebut dengan aliran turbulen.

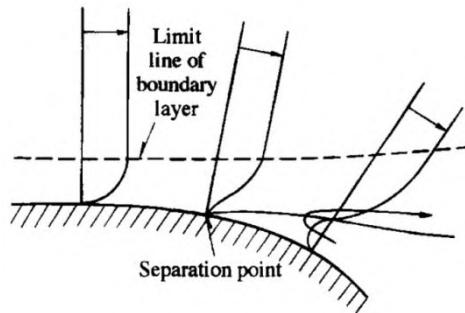
Karakteristik struktur aliran internal (dalam pipa) sangat tergantung dari kecepatan rata-rata aliran dalam pipa, densitas, viskositas dan diameter pipa. Aliran fluida (cairan atau gas) dalam pipa mungkin merupakan aliran laminar atau turbulen. Perbedaan antara aliran laminar dan turbulen secara eksperimen pertama kali dipaparkan oleh **Osborne Reynolds** pada tahun 1883. Eksperimen itu dijalankan dengan menyuntikkan cairan berwarna ke dalam aliran air yang mengalir di dalam tabung kaca. Jika fluida bergerak dengan kecepatan cukup rendah, cairan berwarna akan mengalir di dalam sistem membentuk garis lurus tidak bercampur dengan aliran air, seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2.1 (a). Pada kondisi seperti ini, fluida masih mengalir secara laminar. Jadi pada prinsipnya, jika fluida mengalir cukup rendah seperti kondisi eksperimen ini, maka terdapat garis alir. Bila kecepatan fluida ditingkatkan, maka akan dicapai suatu kecepatan kritis. Fluida mencapai kecepatan kritis dapat ditandai dengan terbentuknya gelombang cairan warna. Artinya garis alir tidak lagi lurus, tetapi mulai bergelombang dan kemudian garis alir menghilang, karena cairan berwarna mulai menyebar secara seragam ke seluruh arah fluida air, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.1 (b). Perilaku ketika fluida mulai bergerak secara acak (tak menentu) dalam bentuk arus-silang dan pusaran, menunjukkan bahwa aliran air tidak lagi laminar. Pada kondisi seperti ini garis alir fluida tidak lagi lurus dan sejajar, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2.1 Percobaan Reynold tentang Aliran laminar (a) dan aliran turbulen (b) (**Fatih 2012**)

## 2.2. Separasi Aliran

Dalam sebuah aliran dimana tekanan mengalami penurunan searah dengan arah aliran, fluida akan mengalami percepatan dan lapisan batas menipis. Dalam suatu saluran yang mengalami kontraksi, tekanan memiliki gradien yang negatif yang dapat membuat aliran stabil sementara itu turbulensi secara bertahap menurun. Sebaliknya, hal-hal yang sangat berbeda dalam aliran yang memiliki gradien tekanan yang positif dimana tekanan meningkat searah dengan arah aliran, seperti pada aliran divergen atau aliran pada dinding yang melengkung seperti pada gambar 2.2



Gambar 2.2 Separasi lapisan batas (**Nakayama: 1999**)



Pada gambar 2.2, terlihat bahwa fluida yang berjarak cukup jauh dari dinding memiliki kecepatan yang tinggi dan juga inersia yang besar. Oleh karena itu, aliran dapat melanjutkan ke arah *downstream* dan mampu juga untuk menghadapi tekanan *downstream* yang tinggi. Sedangkan fluida yang berdekatan dengan dinding memiliki kecepatan yang rendah, sehingga tidak dapat mengatasi tekanan untuk mencapai *downstream* karena hanya memiliki inersia yang kecil pula. Dengan demikian kecepatan aliran menjadi lebih kecil dan lebih kecil lagi hingga pada akhirnya gradien kecepatannya menjadi nol. Titik ini disebut sebagai titik separasi.

Setelah terjadinya separasi, gradien kecepatan menjadi negatif sehingga menghasilkan aliran balik (*backflow*). Dalam area sekitar titik separasi, suatu vortisitas akan berkembang dan aliran akan menjadi turbulen. Berkembangnya vortisitas menyebabkan terbentuknya *vortex*, adanya *vortex region* akan mengurangi luas penampang efektif yang dilalui aliran utama, sehingga aliran mengalami percepatan. Akibatnya terjadilah *pressure drop*. Untuk alasan ini, kerugian energi menjadi meningkat. Fenomena seperti inilah yang terjadi pada sebuah *elbow*, pada *elbow* aliran salah satu dinding akan menjauhi arah aliran, bahkan dapat terjadi dengan tiba-tiba.

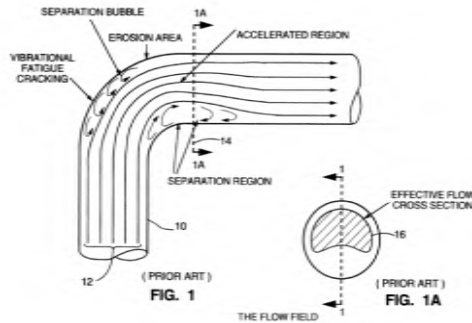
### 2.2.1 Separasi aliran di dalam *elbow* 90°

Separasi aliran didalam *elbow* 90° disebabkan karena terbentuknya *adverse pressure gradient* (APG) atau kenaikan tekanan pada dinding *elbow* baik *inner wall* maupun *outer wall*. Proses terjadinya separasi berawal dari aliran yang melintasi *elbow* 90° melawan gaya gesek pada dinding *elbow* ditambah dengan adanya kenaikan tekanan (*adverse pressure gradient*). Kenaikan tekanan pada sisi *outer wall elbow* diakibatkan oleh radius kelengkungan *elbow*. Semakin besar radius kelengkungan *elbow* maka kenaikan tekanan akan semakin besar. Gesekan antara dinding *elbow* 90° dan partikel fluida dapat mengurangi

momentum aliran ketika melintas di sepanjang *elbow*  $90^\circ$  dikarenakan fluida yang mengalir harus melawan tegangan geser, sehingga ketika melewati *adverse pressure gradient* (APG) aliran akan terseparasi (*separation loss*).

Sedangkan separasi aliran pada *inner wall* disebabkan oleh gaya inersia yang terjadi. Hal ini akan terbentuk *adverse pressure gradient* (APG) pada *inner wall* yang mengakibatkan aliran akan terseparasi. Akibat separasi aliran akan berbalik arah dari aliran utamanya (*backflow*). Karena aliran ini mempunyai momentum yang rendah, maka aliran ini akan terjebak dan terbentuklah *vortex flow* pada sisi *corner elbow*. *Vortex* merupakan aliran yang terjebak dan berpusar-pusar diantara aliran utama dan dapat mengurangi energi aliran sehingga memberikan pengaruh terhadap timbulnya *pressure drop*. *Vortex* pada *elbow*  $90^\circ$  terjadi akibat adanya interaksi *boundary layer* dan *endwall* yang berkembang pada dinding. Terjadinya separasi aliran pada sisi *inner* dan *outer wall* serta *vortex* pada sisi *corner* akan menimbulkan *blockage effect* dan menyebabkan luas penampang aliran utama (*effectiveness flow area*) pipa akan mengecil. Timbulnya *blockage effect*, *secondary flow* pada *corner* dan *surface roughness* merupakan penyebab terjadinya *pressure drop* pada aliran.

Penelitian tentang separasi aliran di dalam *elbow* pernah dilakukan oleh **Cheng (1994)** dengan menginjeksikan cairan berwarna pada pipa transparan untuk memperoleh ilustrasi *streamline* di dalam *elbow*. Kemudian diambil gambarnya menggunakan movie picture seperti yang terlihat pada gambar 2.3



Gambar 2.3 Separasi aliran pada *curved pipe* (Cheng, 1994)

Pada gambar 2.3 terlihat bahwa terjadi separasi aliran di sisi *inner wall* maupun *outer wall elbow*. Pada *outer wall* terjadi kenaikan tekanan APG didekat upstream elbow yang menyebabkan aliran terseparasi (*separation loss*). Begitu juga pada sisi *inner wall*, terjadi kenaikan tekanan (APG) di dekat downstream elbow. Separasi aliran yang terjadi pada sisi *inner wall* dan *outer wall* ini membuat *effective flow area* berkurang.

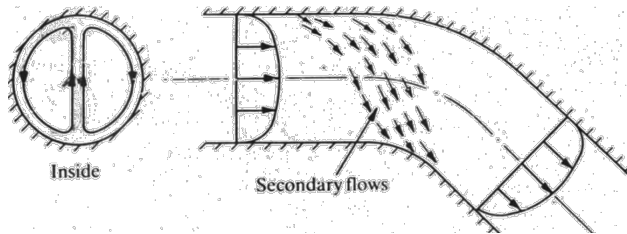
### 2.2.2 Mekanisme terjadinya *Secondary flow* di dalam elbow 90°

Terbentuknya aliran sekunder pada *elbow* disebabkan oleh adanya perbedaan distribusi energi pada sisi inner dan outer wall. Perbedaan ini terjadi akibat adanya beda tekanan pada sisi dalam dengan sisi luar. Semakin ke sisi luar maka tekanan statisnya semakin besar.

Oleh karena itu tekanan pada sisi *outer wall* lebih besar daripada sisi *inner wall*. Hal ini sesuai dengan persamaan Euler pada koordinat normal *streamline* yang menyatakan bahwa semakin besar radius kelengkungan maka tekanan yang terjadi semakin besar.

Aliran sekunder pada saluran *circular elbow* 90° terjadi ketika aliran mulai memasuki *elbow*. Hal ini dikarenakan energi

pada *outer wall* lebih besar dari pada *inner wall*, sehingga aliran tidak hanya bergerak searah aliran utama saja karena adanya kecepatan, tetapi juga bergerak secara tangensial menuju *inner*. Pada belokan pipa *secondary flow* di dalam *elbow* terlihat jelas pada sisi *cross section*nya (gambar 2.4).



Gambar 2.4 *Secondary flow* (Miller, 1990)

**Miller (1990)** melakukan penelitian tentang aliran melintasi *elbow* yaitu apabila aliran melintasi saluran melengkung pasti aliran mengalami gaya sentrifugal baik pada sisi *inner wall* maupun *outer wall*.

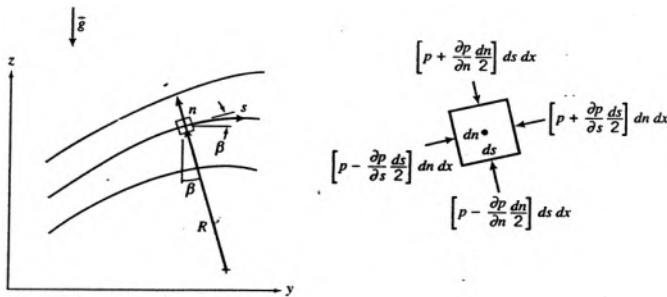
Sedangkan pada *elbow*, *secondary flow* tidak hanya diakibatkan oleh adanya belokan pipa sehingga energi *outer* lebih besar daripada *inner*, tetapi dikarenakan juga adanya *vortex* pada sisi *corner* baik pada *inner* maupun *outer* yang bergerak secara rotasi dan translasi. Munculnya separasi aliran pada sisi *inner* dan *outer wall* serta terbentuknya *vortex* pada *corner* inilah yang menyebabkan aliran mengalami penyumbatan aliran (*blockage effect*). Hal ini yang membedakan terbentuknya *secondary flow* pada *Square-Sectioned elbow* dan *circular elbow*.

### 2.3 Persamaan Euler Dalam Koordinat Streamline

Untuk menggambarkan aliran fluida di sepanjang *streamline* pada kondisi *steady flow*, maka setiap partikel fluida berurutan yang melewati sebuah titik tertentu akan mengikuti lintasan yang sama. *Streamline* itu sendiri adalah sembarang garis yang dilukiskan dalam medan aliran, dimana

garis singgung pada setiap titik dalam garis tersebut menyatakan arah kecepatan aliran. Karena setiap kecepatan aliran hanya menyinggung *streamlines*, maka ini berarti tidak ada aliran yang memotong maupun melintasi *streamline*. Persamaan gerakannya dinyatakan dalam koordinat *streamline* yang dibangun dari persamaan Euler, untuk *inviscid flow*, dinyatakan pada persamaan 2.1.

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = \rho \vec{g} - \nabla p \quad (2.1)$$



Gambar 2.5 Gerakan partikel fluida di sepanjang streamline  
(Fox dan Mc. Donald, 1998)

Gerakan partikel fluida di dalam medan aliran diilustrasikan pada gambar 2.5 Dengan mengabaikan efek ketinggian dan *steady flow*, maka persamaan gerak di sepanjang *streamline* dinyatakan sebagai:

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} - g \frac{\partial z}{\partial s} = \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial s}, \quad (2.2)$$

karena *steady flow* dan gaya body diabaikan maka persamaanya menjadi

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} = -V \frac{\partial V}{\partial s}. \quad (2.3)$$

Persamaan di atas kita dapat mengetahui hubungan antara tekanan dan kecepatan dari sebuah partikel fluida di dalam medan aliran, dimana besarnya tekanan berbanding terbalik dengan kecepatan. Hal ini memenuhi hukum kekekalan energi, bahwasanya jika aliran diasumsikan tanpa gesekan maka penjumlahan komponen tekanan dan kecepatan pada setiap titik adalah sama. Sedangkan persamaan gerak *streamline* pada arah normal dinyatakan sebagai:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} + g \frac{\partial z}{\partial n} = \frac{V^2}{R} \quad (2.4)$$

Karena steady flow di bidang horizontal maka persamaanya menjadi

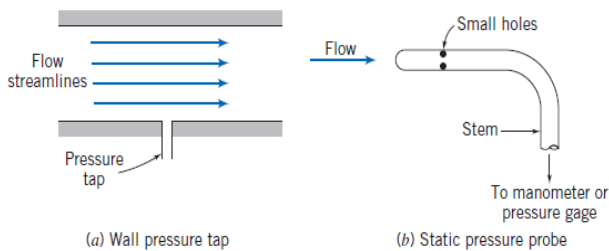
$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} = \frac{V^2}{R} \quad (2.5)$$

Persamaan di atas menyatakan bahwa perubahan tekanan di sepanjang normal *streamline* akan terjadi jika terdapat perubahan radius kelengkungan. Semakin besar radius kelengkungan maka tekanan yang terjadi juga semakin besar. Perbedaan tekanan ini digunakan untuk mengimbangi gaya sentrifugal. Namun jika streamlinenya lurus ( $R \approx \infty$ ) maka tidak ada perubahan tekanan pada normal *streamline*. Oleh karena itu aliran di dalam pipa lurus, tekanan pada sisi normalnya konstan.

## 2.4 Tekanan Statis, Stagnasi, dan Dinamis

Tekanan yang digunakan pada persamaan Bernoulli adalah tekanan termodinamis atau lebih dikenal dengan tekanan statis. Tekanan statis adalah tekanan yang diukur oleh alat ukur yang bergerak bersama-sama aliran dengan kecepatan yang sama. Bagaimanapun juga cara pengukuran yang demikian sangat sulit dilakukan. Oleh karena itu perlu ada cara yang praktis untuk mengukurnya.

Fluida yang mengalir lurus akan mempunyai *streamlines* lurus pula dan tidak mempunyai variasi tekanan ke arah normal dari aliran *streamlines* tersebut. Kenyataan ini memungkinkan untuk melakukan pengukuran tekanan statis dengan menggunakan *wall pressure tap* yang ditempatkan di daerah dimana aliran *streamlines* lurus, seperti yang terlihat pada gambar 2.6



Gambar 2.6 Pengukuran tekanan statis  
(Fox and McDonald's, 8<sup>th</sup> edition)

*Pressure tap* adalah sebuah lubang kecil yang dibuat pada dinding dimana axisnya tegak lurus terhadap permukaan dinding. Apabila lubang tersebut tegak lurus terhadap dinding suatu saluran dan bebas dari kotoran, akurasi pengukuran tekanan statis akan dapat diperoleh dengan menghubungkan *pressure tap* dengan suatu alat ukur yang sesuai. Apabila fluida mengalir jauh dari dinding atau bila *streamlines*-nya berbentuk kurva, akurasi pengukuran tekanan statis dapat diperoleh dengan menggunakan *pressure probe*, seperti yang terlihat pada gambar 2.6. Tekanan stagnasi adalah tekanan yang dapat diukur bila aliran diperlambat sampai kecepatannya sama dengan nol dengan proses tanpa gesekan. Pada aliran *incompressible*, persamaan Bernoulli dapat digunakan sehubungan dengan perubahan kecepatan dan tekanan sepanjang *streamlines*. Dengan mengabaikan diferensial elevasi, persamaan Bernoulli menjadi :

$$\frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} = \text{konstan}$$

Bila tekanan statis  $p$  pada suatu titik dalam suatu aliran dimana kecepatannya adalah  $V$ , maka tekanan stagnasi  $p_o$ , dimana kecepatan stagnasi  $V_o$  adalah nol, maka :

$$\frac{p_o}{\rho} + \frac{V_o^2}{2} = \frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2}$$

dimana  $V_o = 0$ , sehingga :

$$\frac{p_o}{\rho} = \frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2}$$

$$\text{atau,} \quad p_o = p + \frac{1}{2} \rho V^2$$

Persamaan di atas adalah kalimat matematis dari definisi tekanan stagnasi, yang valid untuk aliran *incompressible*. Bentuk  $\frac{1}{2} \rho V^2$  umumnya disebut tekanan dinamis. Jadi persamaan tekanan dinamis adalah :

$$\frac{1}{2} \rho V^2 = p_o - p$$

dan kecepatannya adalah :

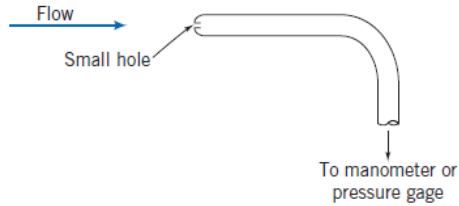
$$V = \sqrt{\frac{2(p_o - p)}{\rho}} \quad (2.10)$$

(Fox, and Mc. Donald, 8<sup>th</sup> edition)

Jadi, bila tekanan stagnasi dan tekanan statis diukur pada suatu titik, maka persamaan kecepatan diatas akan menghasilkan kecepatan aliran lokal.

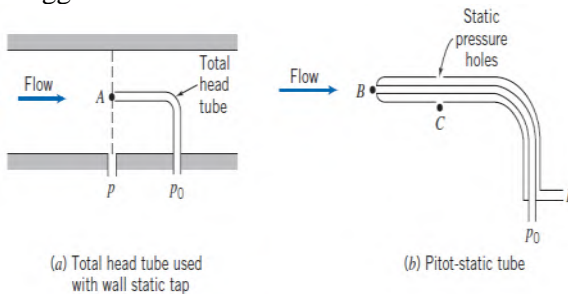
Tekanan stagnasi dapat diukur dengan menggunakan sebuah *probe* dimana lubangnya langsung berhadapan dengan aliran seperti terlihat pada gambar 2.7. *Probe* ini dikenal dengan nama *stagnation pressure probe* atau *pitot tube*. Daerah pengukurannya juga harus sejajar dengan arah aliran lokal.





Gambar 2.7 Pengukuran tekanan stagnasi  
(Fox, and Mc. Donald, 8<sup>th</sup> edition)

Pada gambar 2.8 terlihat bahwa tekanan statis yang sejajar dengan garis di titik A dapat dibaca dari *wall static pressure tap*. Sedangkan tekanan stagnasi dapat diukur langsung pada titik A dengan menggunakan *total head tube*.



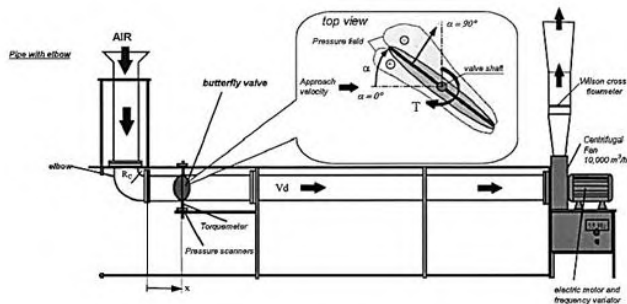
Gambar 2.8 Pengukuran Tekanan Stagnasi dan Tekanan Statis  
(Fox, and Mc. Donald, 8<sup>th</sup> edition)

Terkadang dua buah *probe* dapat dikombinasikan seperti pada *pitot-static tube*. Tabung bagian dalam digunakan untuk mengukur tekanan stagnasi pada titik B, sedangkan tekanan statis pada titik C dibaca melalui lubang-lubang kecil pada tabung bagian luar. Pada daerah aliran dimana variasi tekanan statis dalam arah *streamwise*-nya kecil, *pitot-static tube* dapat digunakan untuk mencari kecepatan pada titik B, dengan menggunakan persamaan kecepatan di atas dan mengasumsikan  $p_b = p_c$

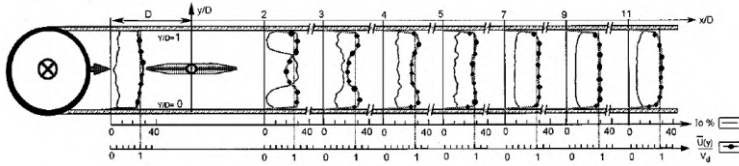
Perbedaan antara tekanan lokal statik pada setiap titik dalam aliran dengan tekanan statik pada *freestream* bergantung langsung dengan tekanan dinamik pada *freestream*, dan perbandingan ini yang disebut dengan koefisien tekanan atau *pressure coefficient* ( $C_p$ ).

## 2.5 Karakteristik Aliran Yang Melewati Saluran Dengan *Butterfly Valve* Sebagai Body Pengganggu

Danbon dan Sollicec (2000) melakukan eksperimen pada saluran berpenampang *circular* yang di dalamnya dipasang *butterfly valve* sebagai pengontrol laju aliran fluida, dengan memanfaatkan torsi yang dihasilkan oleh gaya-gaya aerodinamisnya akan membuka atau menutup seiring bertambah atau berkurangnya laju aliran massa. Eksperimen dilakukan pada kecepatan 40 m/s dan intensitas turbulen 2%, *valve* diletakkan di posisi  $x/D=1$  dengan variasi  $\alpha=0^\circ$  dan  $\alpha=30^\circ$  serta bilangan Reynolds  $5.0 \times 10^4 < Re < 10^6$ , seperti yang terlihat pada gambar 2.9. Kemudian hasil yang diperoleh adalah profil kecepatan dan profil intensitas turbulen yang digambarkan berupa *dotlines* dan *solidlines*, seperti yang ditunjukkan berturut-turut pada gambar 2.14; 2.15; 2.16; 2.17.

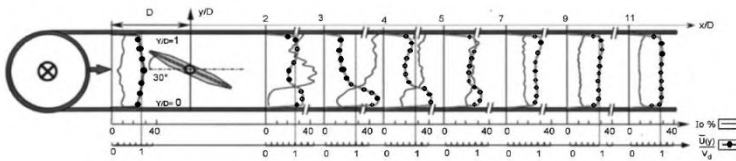


Gambar 2.9. *Test Section* serta posisi *valve*  $x/D=1$  dan sudut  $\alpha$   
(Danbon dan Sollicec :2000 )



Gambar 2.10. Profil kecepatan dan intensitas turbulen pada medan aliran pada sudut  $\alpha=0^\circ$  dengan *elbow*  
(Danbon dan Sollic 2000)

Ketika *valve* dipasang secara *fully open* ( $0^\circ$ ) dengan *elbow* seperti pada gambar 2.10 terlihat ada perubahan yang signifikan terhadap profil kecepatan sesaat setelah melalui *valve*, diketahui bahwa nilai  $\frac{\bar{U}(y)}{V_d} < 1$  pada *centreline* ( $y/D=0,5$ ) namun akan berangsur-angsur kembali *fully developed* pada  $x/D=12$

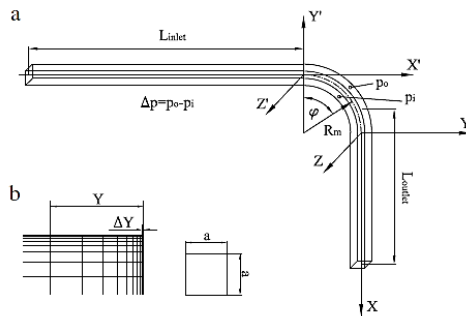


Gambar 2.11. Profil kecepatan dan intensitas turbulen pada medan aliran pada sudut  $\alpha=30^\circ$  dengan *elbow*  
(Danbon dan Sollic 2000)

Pada sudut kemiringan  $30^\circ$  dengan *elbow* (gambar 2.11) aliran telah *fully developed* pada  $x/D=12$ . Secara keseluruhan, untuk aliran yang melalui *valve* bukaan  $30^\circ$  akan lebih cepat kembali normal dari pada *fully open*, disebabkan oleh *blockage effect* yang lebih besar akan memberikan momentum tambahan untuk melawan gaya gesernya.

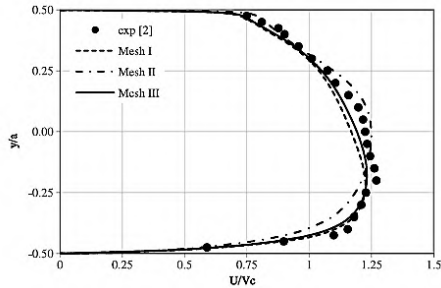
## 2.6 Karakteristik Aliran pada *Square Duct* dengan *Elbow 90°*

Dalam menganalisa karakteristik aliran melalui *Square-Sectioned duct* seperti yang dilakukan secara simulasi dan eksperimen oleh **Rup dan Sarna (2011)**. Simulasi ini menggunakan model turbulen RSM (*Reynolds Stress Model*) dilakukan pada  $Re = 40000$  yang memiliki ukuran geometri  $a \times a = 80 \times 80$  mm,  $D_h = 80$  mm dan  $L_{inlet} = L_{outlet} = 20D_h = 1600$  mm seperti yang terlihat pada gambar 2.14. Variasi yang dilakukan pada kerapatan *meshing*, dengan jumlah mesh  $V_k = 553\ 052$ ,  $V_k = 1766\ 079$ , and  $V_k = 1034\ 775$

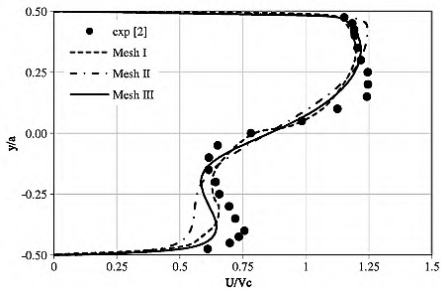


Gambar 12. a) Posisi pengambilan data pada *domain* uji  
b) Mesh pada *Volume* (**Rup dan Sarna : 2011**)

Hasil yang didapatkan yaitu membandingkan hasil eksperimen dan simulasi profil kecepatan pada jarak tertentu dan koefisien tekanan pada aliran sepanjang *elbow*.

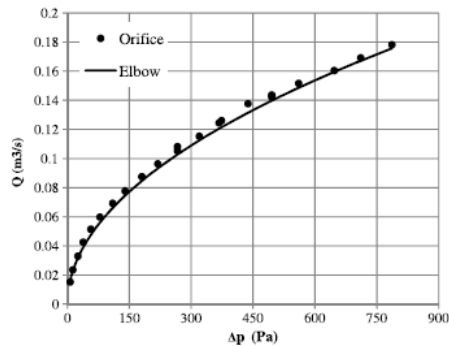


Gambar 2.13 Perbandingan profil kecepatan didapat dari simulasi dan eksperimen untuk  $\theta = 60^\circ$  ( $z/Dh = 0.0$ )  
(Rup dan Sarna : 2011)



Gambar 2.14 Perbandingan profil kecepatan didapat dari simulasi dan eksperimen untuk  $x/Dh = 1.0$  and  $z/Dh = 0.0$   
(Rup dan Sarna : 2011)

Pada gambar 2.13, mendeskripsikan bahwa hasil yang didapat dari simulasi mendekati hasil eksperimen untuk profil kecepatan sepanjang *elbow* pada lokasi  $60^\circ$ . Terdapat perbedaan yang jelas terlihat pada gambar 2.14 yang menunjukkan profil kecepatan pada dengan lokasi  $x/Dh = 1.0$  and  $z/Dh = 0.0$  hanya satu simulasi yang mendekati hasil eksperimen yaitu pada variasi *mesh* III ( $V_k = 1034\ 775$ ). Terjadi perubahan kecepatan aliran dimana pada sisi *outer* memiliki kecepatan yang lebih besar daripada sisi *inner* apabila dibandingkan dengan gambar 2.13 pada saat aliran melewati *elbow*.



Gambar 2.15 Perbandingan koefisien tekanan pada kedua sisi *inner* dan *outer wall elbow* hasil simulasi dan eksperimen  
(Rup dan Sarna : 2011)

Gambar 2.15 memberikan informasi tentang perbandingan antara *pressure drop* dan kapasitas aliran. Dapat dilihat dari grafik bahwa semakin tinggi kapasitas maka semakin besar *pressure drop* yang didapat

## 2.7 Pressure Loss Coefficient pada Ducting yang Dilengkapi dengan Butterfly Valve dengan variasi bukaan sudut dan variasi Reynolds Number

Kimura dkk.(1995) melakukan studi eksperimen untuk menghitung *pressure loss* dan kavitasi yang terjadi pada *ducting* yang menggunakan *butterfly valve* dimana pada studi eksperimen ini menggunakan fluida air. Studi eksperimen dilakukan untuk membandingkan *pressure loss* dari *flat valve* dan 3 macam *butterfly valve* yang digunakan yaitu tipe *round hub*, tipe *square hub* dan tipe *round hub split*. Saluran yang dapat digunakan pada studi eksperimen memiliki penampang *circular* dan penampang bujursangkar (terdapat 2 *ducting*) dengan diameter 50 mm hingga 100 mm. Pada saluran yang berpenampang *ircular* menggunakan *flat valve* dan pada pe Variasi yang digunakan adalah bukaan dari

*butterfly valve* dari sudut  $10^\circ$  hingga  $90^\circ$  (*fully open*) dan juga *Reynolds number* dari  $7 \times 10^3 < Re < 5 \times 10^5$  dengan maksimum kecepatan 10 m/s. Perbedaan tekanan yang dihitung antara  $P_1$  dan  $P_2$  dimana untuk  $P_1$  terletak pada jarak  $3.5d$  pada upstream dan  $P_2$  terletak pada jarak  $11d$  pada downstream setelah valve. Berikut adalah saluran yang digunakan oleh Kimura :

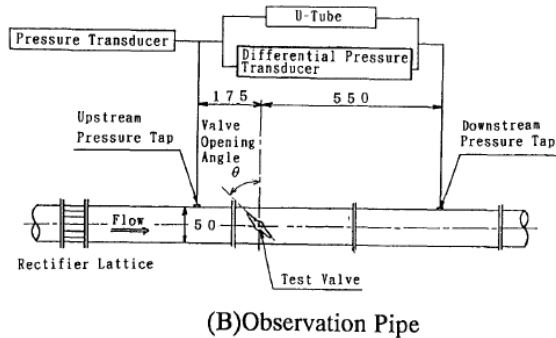
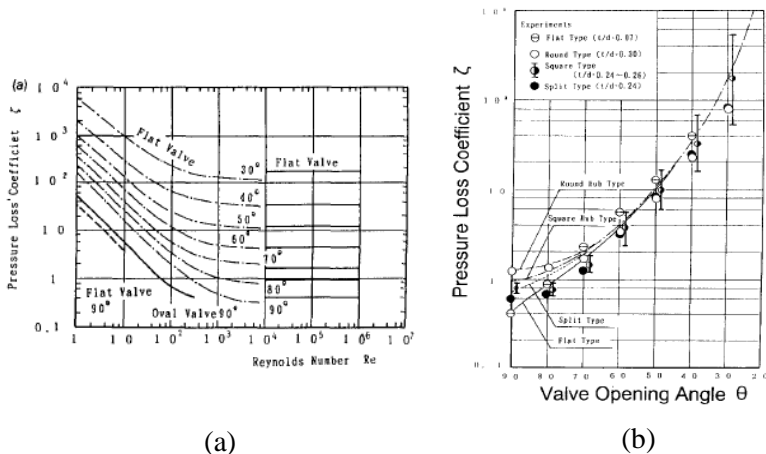


Fig. 1. Experimental equipment. (a) Water tunnel. (b) Observation pipe.

Gambar 2.16 Peralatan yang digunakan pada studi eksperimen yang dilakukan Kimura (1995)

Pada gambar 2.16 merupakan saluran pipa yang digunakan untuk studi eksperimen dimana didalamnya terdapat katup yang dipasang untuk pengujian. Sebelum katup terdapat *upstream pressure tap* yang digunakan untuk mengukur tekanan pada sisi *upstream* dan *downstream pressure tap* diletakkan setelah katup yang digunakan untuk mengukur tekanan pada sisi *downstream*. Perbedaan tekanan yang terjadi diantaranya berupa  $\Delta P$  yang nantinya digunakan untuk menghitung *pressure loss coefficient*. Hasil yang didapatkan dengan variasi bukaan sudut katup dan *Reynolds number* adalah sebagai berikut :



Gambar 2.17 (a) Hasil dari pressure loss coefficient terhadap variasi Reynolds number dan  
(b) Hasil dari pressure loss coefficient variasi terhadap bukaan sudut katup yang digunakan

Gambar 2.17 (a) merupakan hasil dari studi eksperimen Kimura(1995) berupa perbandingan *pressure loss coefficient* dengan variasi *Reynolds number* dari  $7 \times 10^3 < Re < 5 \times 10^5$  pada *flat valve*. Hasil yang didapatkan adalah dengan bertambahnya *Reynolds number* maka *pressure loss coefficient* yang didapatkan semakin menurun namun *pressure loss coefficient* akan semakin konstan pada *Reynolds number* tinggi yaitu mulai *Reynolds number*  $4 \times 10^4$ . Variasi bukaan sudut dari *flat valve* juga sangat berpengaruh dimana pada saat bukaan  $30^\circ$  memiliki *pressure losses coefficient* yang paling besar. Selanjutnya pada gambar 2.17 (b) merupakan *pressure loss coefficient* yang didapat dengan variasi sudut bukaan pada masing – masing jenis *butterfly valve*. Pada bukaan  $90^\circ$  (*fully open*) *pressure losses coefficient* paling besar didapat pada *butterfly valve* tipe *rounded hub* dan paling kecil adalah *flat valve*. Seiring dengan semakin tertutupnya valve,

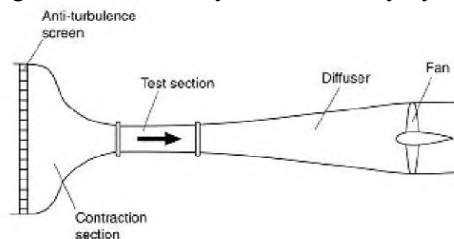


*pressure losses coefficient* yang didapatkan tidak memiliki banyak perbedaan dimana pada bukaan  $30^\circ$  *butterfly valve* pada tipe *square hub* memiliki *pressure loss coefficient* paling tinggi daripada bentuk *butterfly valve* yang lainnya. Hal ini dapat disimpulkan bahwa variasi *Reynolds number* dan variasi bukaan katup sangat *mempengaruhi pressure loss coefficient* pada suatu saluran.

## 2.8 Terowongan Angin (*windtunnel*)

*Wind Tunnel* atau terowongan angin adalah salah satu alat untuk membantu dalam menganalisa efek angin yang bergerak di sekitar objek atau model. Secara umum, terowongan angin dibedakan menjadi 2 jenis, yaitu terbuka dan tertutup.

Terowongan terbuka (*Open circuit windtunnel*) mempunyai sirkuit yang terbuka di bagian depan dan belakangnya. Seperti pada gambar 2.18 komponen dari terowongan angin secara berurutan terdiri dari, *honey comb*, *nozzle*, *test section*, *diffuser*, dan *fan*. Angin yang digunakan untuk tes berasal dari udara luar yang terisap masuk ke dalam terowongan dan kemudian akan dibuang kembali ke udara luar di bagian belakang terowongan. Terowongan jenis ini punya kelemahan yaitu sangat tergantung pada kondisi udara luar seperti kecepatan angina, temperatur, dan tekanan udara. Untuk ukuran dan kecepatan tertentu diperlukan lebih banyak energi untuk menjalankannya. Secara umum, berisik sehingga mengakibatkan masalah lingkungan dan membatasi jam operasi. Keuntungan dari terowongan angin ini adalah biaya konstruksinya yang rendah.



Gambar 2.18 *Open circuit windtunnel* ([www.ustudy.in](http://www.ustudy.in))

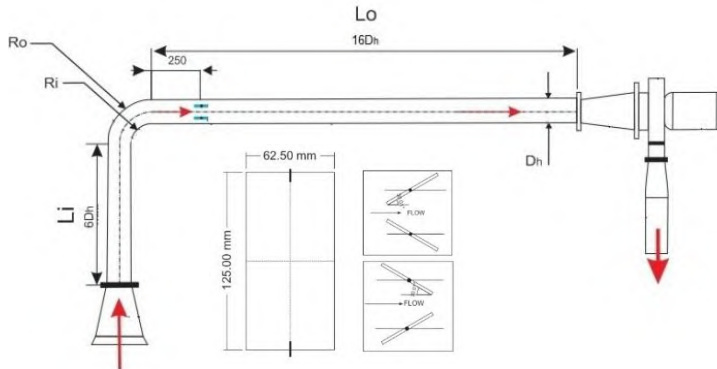
## **BAB 3**

### **METODE PENELITIAN**

Pada bab ini dibahas metode penelitian yang digunakan, yaitu metode penelitian secara eksperimen untuk menganalisis karakteristik aliran dalam *square ducting* dengan variasi sudut bukaan *double damper* yang berbentuk seperti *nozzle* dan *diffusor*. Untuk pengambilan *velocity profile* variasi sudut nya  $0^\circ$  dan  $30^\circ$  yang membentuk seperti *nozzle* dan *diffusor*. Sedangkan untuk pengambilan *pressure drop*, koefisien *loss elbow  $90^\circ$* , dan koefisien *loss damper* dilakukan variasi bukaan sudut dari  $0^\circ$  hingga  $30^\circ$  dengan penambahan  $10^\circ$  masing – masing berbentuk seperti *nozzle* dan *diffusor*. *Double damper* terletak pada daerah *downstream* setelah outlet *elbow  $90^\circ$*   $x/D_h=2$  dan kecepatan sisi upstream pada  $Re_{D_h} 7,88 \times 10^4$ . Pembahasan metodologi penelitian meliputi instalasi dan test section penelitian, peralatan pendukung penelitian, analisa dimensi, prosedur pengambilan data, serta langkah-langkah dalam pengelolaan data.

### **3.1 Skema Penelitian**

Instansi penelitian berupa benda uji (*test section*) dan peralatan pendukung seperti *nozzle*, *elbow*, *difuser*, *centrifugal fan* dan *connector*. *Damper* dipasang pada *downstream straight channel* dengan jarak  $x = 2D_h$  dari outlet elbow  $90^\circ$  dengan variasi bukaan sudut berbentuk seperti *nozzle* dan *diffusor*. Skema instalasi penelitian secara keseluruhan ditunjukkan pada gambar 3.1.



Gambar 3.1 Skema instalasi penelitian

### Spesifikasi Square Ducting :

Bentuk Penampang *Square* (bujursangkar) dengan *elbow 90°*

Bahan	: Akrilik
Tebal	: 8 mm
Panjang total garis <i>elbow 90°</i> )	: 2973,125 mm
$l_i$ (panjang total <i>inner elbow 90°</i> )	: 3169,375 mm
$l_o$ (panjang total <i>outer elbow 90°</i> )	: 3267,5 mm
$L_i$ (upstream straight channel)	: 750 mm
$L_o$ (downstream straight channel)	: 2125 mm
$r_m$ ( <i>centerline elbow 90° radius</i> )	: 187,5 mm
$r_i$ ( <i>inner radius</i> )	: 125 mm
$r_o$ ( <i>outer radius</i> )	: 250 mm
$D_h$ (diameter hidrolis)	: 125 mm
$x$ (jarak outlet <i>elbow 90°</i> dengan <i>damper</i> )	: 250 mm
$a$ (tinggi <i>damper</i> )	: 125 mm
$b$ (lebar <i>damper</i> )	: 62.5 mm

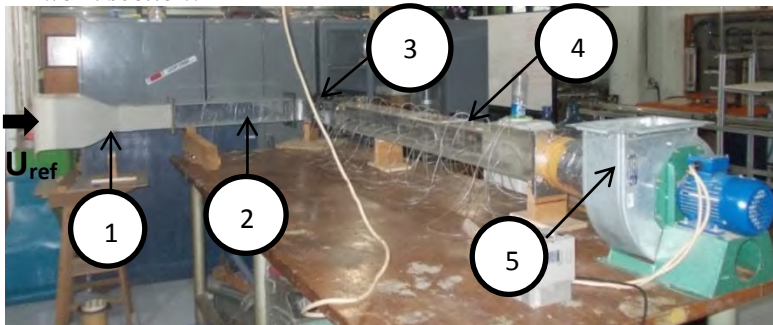
## 3.2 Komponen Utama dan Alat Ukur

### 3.2.1 Square Ducting

Dalam penelitian digunakan instalasi *Square ducting* dan *elbow 90°* dengan maksud untuk dapat menguji benda dalam skala model. Hal ini disebabkan pengukuran dengan

skala sebenarnya cukup sulit dan membutuhkan biaya yang tidak sedikit. Oleh sebab itu, dibuatlah *Square ducting* dan *elbow 90°* dengan pembuatan kondisi-kondisi yang mendekati kenyataan, sehingga hasilnya cukup akurat dan memadai.

*Square ducting* yang digunakan dalam percobaan ini adalah jenis *open circuit*, dimana udara yang dialirkan dalam *ducting* langsung dilepas ke udara bebas setelah melalui *work section*.



Gambar 3.2 Square Ducting

- Keterangan :
1. Nozzle
  2. Upstream Straight Channel
  3. Square-Sectioned Elbow 90°
  4. Downstream Straight Channel
  5. Centrifugal Fan

### 3.2.2 Centrifugal Fan

Pada penelitian ini digunakan 1 buah *centrifugal fan* dan *inverter* (gambar 3.3) dengan spesifikasi sebagai berikut:

- Merk : ElexMax Three-Phase Asynchronous Motor
- Type : 71M4 – 4 B3
- No : 0221

- Voltage : 220 / 380 Voltage
- Frekuensi : 50 Hz
- Daya : 0,75 KW
- Putaran : 1350 RPM
- Berat : 8,7 kg



Gambar 3.3 Centrifugal blower dan inverter

### 3.2.3 *Honey Comb, Screen dan Nozzle*

*Nozzle* berfungsi untuk menambah kecepatan aliran sebelum memasuki *test suction*. Didalam *nozzle* terdapat *screen* dan *honeycomb* yang berfungsi untuk menjadikan aliran mendekati uniform dan mengurangi turbulensi aliran ketika memasuki instalasi *test suction*.



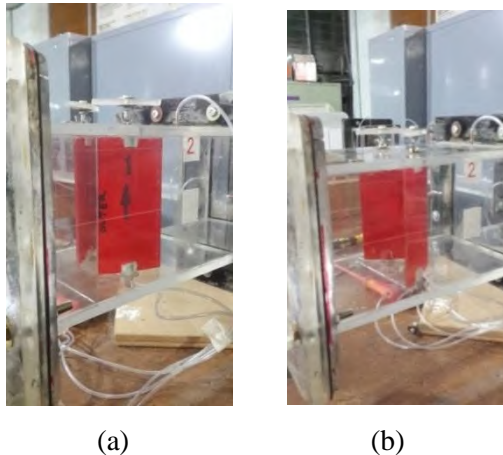
Gambar 3.4 *Honey Comb dan Nozzle*

### 3.2.4 Damper

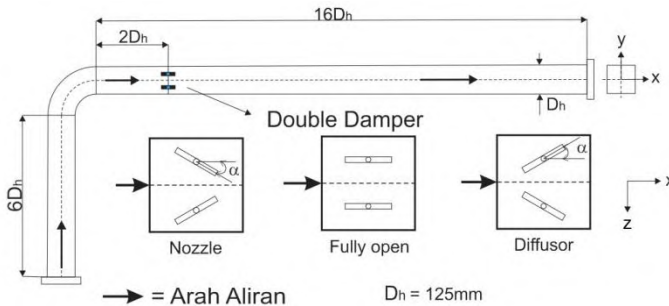
Dalam eksperimen ini, instalasi ducting dipasang bodi pengganggu berupa *butterfly valve* yang terletak pada jarak  $x/D_h = 2$  sesudah outlet *elbow*  $90^\circ$ . Damper diposisikan dekat dengan outlet *elbow*  $90^\circ$  untuk mempercepat profil kecepatan agar konvergen dan mengurangi turbulensi aliran setelah melewati *elbow*  $90^\circ$ . Bentuk damper adalah *rectangular* sesuai pada gambar 3.5 yang menyesuaikan dengan dimensi hidrolik ( $D_h$ ) dan terdapat dua buah damper pada instalasi. Geometri posisi dan bentuk dari damper adalah sebagai berikut :



Gambar 3.5 Bentuk *Double Damper* saat dilepas dari instalasi



Gambar 3.6 Bukaan *Double Damper* (a). sudut  $30^\circ$  *diffusor* dan (b). sudut  $30^\circ$  *nozzle*



Gambar 3.7 Posisi *double damper* pada instalasi

Ukuran dan variasi bukaan double damper adalah sebagai berikut:

- tinggi : 125 mm
- lebar : 62.5 mm
- $x$  ( $x/D_h=2$ ) : 250 mm
- $\alpha$  (variasi bukaan damper) :  $0^\circ$ ,  $30^\circ$  nozzle  $30^\circ$  diffusor  
(velocity profil)  
:  $0^\circ$  sampai  $30^\circ$  dengan penambahan  $10^\circ$  berbentuk nozzle dan diffusor (pressure drop, koefisien loss elbow  $90^\circ$ , koefisien loss damper)

### 3.2.5 Alat Ukur

Pada spesimen ini dibutuhkan beberapa alat ukur untuk mendapatkan tekanan statis dan tekanan stagnasi, diantaranya adalah wall-pressure tap, pitot static tube, transducer dan manometer inclined.

#### 1. Wall-pressure tap

Wall-pressure tap yaitu lubang-lubang kecil berdiameter 1 mm yang terhubung pada manometer atau transducer tekanan serta dipasang sepanjang kontur permukaan benda uji maupun saluran yang searah aliran dan tegak lurus terhadap permukaan.

## 2. Pitot Tube

Alat ini yang ditunjukkan pada gambar 3.8 berfungsi untuk mengukur besarnya tekanan statis sekaligus tekanan stagnasi aliran fluida yang terdapat pada saluran maupun yang terletak dibelakang benda uji. Pergeseran titik pengukuran secara horizontal pada setiap cross section yang sama dilakukan secara manual dengan skala pengukuran tertentu.



Gambar 3.8 Pitot Tube

*Wall pressure tap* dipasang sepanjang *downstream straight channel* mulai dari *outlet elbow 90°* pada setiap dinding *ducting* yang disusun secara paralel pada masing-masing *test section* yang berjarak 125 mm (kecuali pada titik posisi *damper*). Titik pengukuran tekanan statis dimulai pada titik yang berjarak 937,5 mm dari *inlet upstream* sampai pada titik yang berjarak 2937,5 mm dari *inlet upstream*. Sedangkan *stagnation pitot tube* dipasang pada *center line* tepat sejajar dengan *wall pressure tap*, dimana jarak antar tap adalah 125 mm.

**Tabel 3.1 Lokasi perhitungan profil kecepatan**

Section	$x_m$ (mm)	$x_m/l_m$
1	937,5	0,31
2	1062,5	0,35
3	1312,5	0,43
4	1437,5	0,47
5	1562,5	0,51

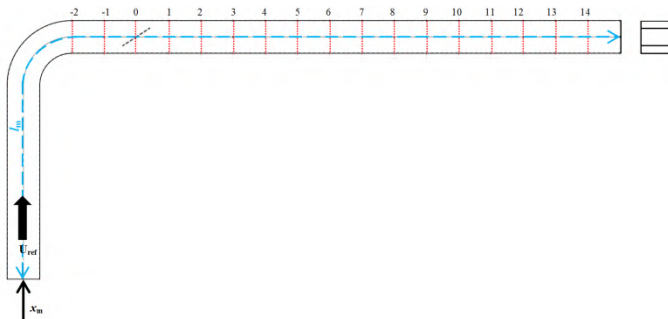
Section	$x_m$ (mm)	$x_m/l_m$
9	2062,5	0,67
10	2187,5	0,71
11	2312,5	0,76
12	2437,5	0,80
13	2562,5	0,84



6	1687,5	0,55
7	1812,5	0,59
8	1937,5	0,63

14	2687,5	0,88
15	2812,5	0,92
16	2937,5	0,96

Jumlah *wall pressure tap* disesuaikan dengan kondisi tekanan pada setiap section. Pada bagian *downstream straight channel* dipasang 16 *wall pressure tap*. Untuk mengetahui profil kecepatan aliran, maka *test section* dibagi menjadi 16 *section* yang akan dijadikan posisi peletakan *pitot tube*. Pada tabel 3.1 dan gambar 3.9 ditunjukkan beberapa lokasi yang akan diteliti untuk mendapatkan profil kecepatan.



Gambar 3.9 Lokasi perhitungan untuk profil kecepatan

### 3. Transducer Tekanan dan Data Aquisisi

Berikut spesifikasi *Transducer* yang akan digunakan dalam percobaan ini :

- Untuk mengukur profil kecepatan
 

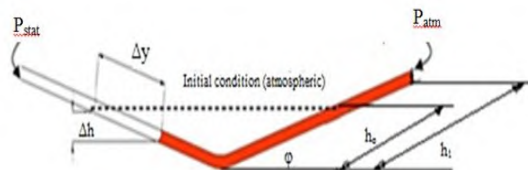
Model	: PX653 - 01D5L
Range	: $\pm 1''$ WC
Akurasi	: 0.25 % FS (Fullscale)
Output	: 1 – 5 VDC
Excitation	: 12 – 36 VDC
Ser.no.	: X14500102

2. Untuk mengukur *pressure drop*, *koefisien losses elbow 90°* dan *koefisien losses damper*

Model	: PX653 - 03D5V
Range	: $\pm 3''$ WC
Akurasi	: 0.25 % FS (Fullscale)
Output	: 1 – 5 VDC
Excitation	: 12 – 36 VDC
Ser.no.	: X11450113

#### 4. *Inclined manometer (Manometer V) dan Mistar*

*Manometer* digunakan sebagai pembaca tekanan yang terukur melalui *wall pressure tap* dan *pitot tube*. *Manometer* yang digunakan mempunyai kemiringan sebesar  $15^\circ$  yang bertujuan untuk mempermudah pembacaan  $\Delta h$ . *Manometer* digunakan sebagai pembaca tekanan statis dan stagnasi yang terukur melalui *wall pressure tap* dan *pitot tube* seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.9.



Gambar 3.10 Inclined Manometer

Spesifikasi manometer yang digunakan sebagai berikut:

- Skala minimum : 1 mm
- Fluida kerja : *Kerosene* ( $SG_{\text{kerosene}} = 0,827$ )
- Kemiringan :  $15^\circ$

### 3.3 Analisa Dimensi Parameter-Parameter yang Dianalisa

Analisa dimensi diperlukan untuk mengetahui apakah suatu parameter berpengaruh terhadap suatu eksperimen. Hubungan antara parameter yang saling mempengaruhi

ditunjukkan dalam bentuk parameter-parameter tanpa dimensi. Metode analisa ini dikenal dengan *Buckingham Pi Theorem*. Dalam skema penelitian pada gambar 3.1. Parameter-parameter yang mempengaruhi karakteristik aliran sepanjang *downstream straight channel*.

- $\Delta p$  : perbedaan tekanan statis lokal dan referensi ( $\text{N/m}^2$ )
- $\rho$  : massa jenis fluida ( $\text{kg/m}^3$ )
- $\mu$  : viskositas absolut fluida ( $\text{kg/(m.s)}$ )
- $U_{ref}$  : kecepatan *freestream* di *inlet upstream straight channel* ( $\text{m/s}$ )
- $u$  : kecepatan local ( $\text{m/s}$ )
- $a$  : tinggi *damper* (m)
- $b$  : lebar *damper* (m)
- $r_m$  : mean radius *elbow*  $90^\circ$  (m)
- $r_i$  : *inner radius elbow*  $90^\circ$  (m)
- $r_o$  : *outer radius elbow*  $90^\circ$  (m)
- $l_i$  : panjang total *inner* searah *streamline elbow*  $90^\circ$  (m)
- $l_o$  : panjang total *outer* searah *streamline elbow*  $90^\circ$  (m)
- $D_h$  : diameter hidrolis saluran (m)
- $L_i$  : panjang *upstream straight channel* (m)
- $L_o$  : panjang *downstream straight channel* (m)
- $x$  : jarak *damper* dari output *elbow*  $90^\circ$  (m)
- $\theta$  : sudut pembukaan *damper*

### 3.3.1 Analisa Grup Tak Berdimensi untuk *Pressure Drop* pada *Square Ducting*

*Pressure drop* pada *Square ducting* diduga dipengaruhi oleh beberapa parameter, sehingga perbedaan tekanan dapat dituliskan sebagai fungsi parameter-parameter tersebut. Secara matematik dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\Delta p = f(\rho, \mu, U_{ref}, a, b, r_m, r_i, r_o, l_i, l_o, L_i, L_o, D_h, x, \theta) \quad (3.1)$$

Dimana  $\Delta p$  adalah perbedaan tekanan ( $\text{N/m}^2$ )

Menggunakan *Buckingham Pi-theorema* dengan parameter  $\rho, U_{ref}$  dan  $D_h$  diperoleh 15 grup tak dimensi yaitu :

1.  $\pi_1 = \frac{\Delta P}{\rho U_{ref}^2}$  ; koefisien tekanan
2.  $\pi_2 = \frac{\mu}{\rho U_{ref} D_h}$  ; bilangan *Reynolds*
3.  $\pi_3 = \frac{r_m}{D_h}$  ; perbandingan *mean radius elbow 90°* dengan diameter hidrolik
4.  $\pi_4 = \frac{r_i}{D_h}$  ; perbandingan *inner radius elbow 90°* dengan diameter hidrolik
5.  $\pi_5 = \frac{r_o}{D_h}$  ; perbandingan *outer radius elbow 90°* dengan diameter hidrolik
6.  $\pi_6 = \frac{l_i}{D_h}$  ; perbandingan panjang total inner searah *streamline elbow radius elbow 90°* dengan diameter hidrolik
7.  $\pi_7 = \frac{l_o}{D_h}$  ; perbandingan panjang total outer searah *streamline elbow radius elbow 90°* dengan diameter hidrolik
8.  $\pi_8 = \frac{L_i}{D_h}$  ; perbandingan panjang *upstream straight channel* dengan diameter hidrolik
9.  $\pi_9 = \frac{L_o}{D_h}$  ; perbandingan panjang *downstream straight channel* dengan diameter hidrolik
10.  $\pi_{10} = \frac{a}{D_h}$  ; perbandingan tinggi damper dengan diameter hidrolik
11.  $\pi_{11} = \frac{b}{D_h}$  ; perbandingan lebar damper dengan diameter hidrolik
12.  $\pi_{12} = \frac{x}{D_h}$  ; perbandingan *arah aliran sumbu x* dengan diameter hidrolik
13.  $\pi_{13} = \frac{y}{D_h}$  ; perbandingan *arah aliran sumbu y* dengan diameter hidrolik

14.  $\pi_{14} = \frac{z}{D_h}$  ; perbandingan *arah aliran sumbu z* dengan diameter hidrolik

15.  $\pi_{15} = \theta$  ; sudut bukaan damper

Hubungan antar grup tak berdimensi adalah sebagai berikut :

$$\bullet \Pi_1 = f(\Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5, \Pi_6, \Pi_7, \Pi_8, \Pi_9, \Pi_{10}, \Pi_{11}, \Pi_{12}, \Pi_{13}, \Pi_{14}, \Pi_{15}) \quad (3.2)$$

$$\bullet \frac{\Delta p}{\rho U_{ref}^2} = f \left( \frac{\mu}{\rho U_{ref} D_h}, \frac{r_m}{D_h}, \frac{r_i}{D_h}, \frac{r_o}{D_h}, \frac{l_i}{D_h}, \frac{l_o}{D_h}, \frac{L_i}{D_h}, \frac{L_o}{D_h}, \frac{a}{D_h}, \frac{b}{D_h}, \frac{x}{D_h}, \frac{y}{D_h}, \frac{z}{D_h}, \theta \right) \quad (3.3)$$

Pada penelitian ini yang menjadi variabel tetap adalah

$$\frac{r_m}{D_h}, \frac{r_i}{D_h}, \frac{r_o}{D_h}, \frac{l_i}{D_h}, \frac{l_o}{D_h}, \frac{L_i}{D_h}, \frac{L_o}{D_h}, \frac{a}{D_h}, \frac{b}{D_h}, \frac{x}{D_h}, \frac{y}{D_h}, \frac{z}{D_h} \text{ dan } \frac{z}{D_h} \text{ sehingga}$$

$$\frac{\Delta p}{\rho U_{ref}^2} = f_1 \left( \frac{\mu}{\rho U_{ref} D_h}, \theta \right) \quad (3.4)$$

dan untuk *pressure drop* tak berdimensi ( $\frac{\Delta p}{\rho U_{ref}^2}$ ) pada *square ducting* adalah sebagai berikut :

$$\frac{\Delta p}{\rho U_{ref}^2} = f_2(Re_{D_h}, \theta)$$

### 3.3.2 Analisa Grup Tak Berdimensi untuk kecepatan pada *Square Ducting*

*Velocity profile* pada *square ducting* diduga dipengaruhi oleh beberapa parameter, sehingga kecepatan dapat dituliskan sebagai fungsi parameter-parameter tersebut. Secara matematik dapat dituliskan sebagai berikut :

$$u = f(\rho, \mu, U_{ref}, a, b, r_m, r_i, r_o, l_i, l_o, L_i, L_o, D_h, x, y, z, \theta) \quad (3.5)$$

dimana  $u$  adalah kecepatan lokal (m/s)

Menggunakan Buckingham Pi-theorema dengan parameter  $\rho, U_{ref}$  dan  $D_h$  diperoleh 15 grup tak dimensi yaitu :

1.  $\pi_1 = \frac{u}{U_{ref}}$  ; kecepatan tak berdimensi
2.  $\pi_2 = \frac{\mu}{\rho U_{ref} D_h}$  ; bilangan *Reynolds*
3.  $\pi_3 = \frac{r_m}{D_h}$  ; perbandingan *mean radius elbow 90°* dengan diameter hidrolik
4.  $\pi_4 = \frac{r_i}{D_h}$  ; perbandingan *inner radius elbow 90°* dengan diameter hidrolik
5.  $\pi_5 = \frac{r_o}{D_h}$  ; perbandingan *outer radius elbow 90°* dengan diameter hidrolik
6.  $\pi_6 = \frac{l_i}{D_h}$  ; perbandingan panjang total inner searah *streamline elbow radius elbow 90°* dengan diameter hidrolik
7.  $\pi_7 = \frac{l_o}{D_h}$  ; perbandingan panjang total outer searah *streamline elbow radius elbow 90°* dengan diameter hidrolik
8.  $\pi_8 = \frac{L_i}{D_h}$  ; perbandingan panjang *upstreams straight channel* dengan diameter hidrolik
9.  $\pi_9 = \frac{L_o}{D_h}$  ; perbandingan panjang *downstreams straight channel* dengan diameter hidrolik
10.  $\pi_{10} = \frac{a}{D_h}$  ; perbandingan tinggi damper dengan diameter hidrolik
11.  $\pi_{11} = \frac{b}{D_h}$  ; perbandingan lebar damper dengan diameter hidrolik

12.  $\pi_{12} = \frac{x}{D_h}$  ; perbandingan *arah aliran sumbu x* dengan diameter hidrolik
13.  $\pi_{13} = \frac{y}{D_h}$  ; perbandingan *arah aliran sumbu y* dengan diameter hidrolik
14.  $\pi_{14} = \frac{z}{D_h}$  ; perbandingan *arah aliran sumbu z* dengan diameter hidrolik
15.  $\pi_{15} = \theta$  ; sudut bukaan damper

Hubungan antar grup tak berdimensi adalah sebagai berikut :

$$\bullet \Pi_1 = f(\Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5, \Pi_6, \Pi_7, \Pi_8, \Pi_9, \Pi_{10}, \Pi_{11}, \Pi_{12}, \Pi_{13}, \Pi_{14}, \Pi_{15}) \quad (3.6)$$

$$\bullet \frac{u}{U_{ref}} = f\left(\frac{\mu}{\rho U_{ref} D_h}, \frac{r_m}{D_h}, \frac{r_i}{D_h}, \frac{r_o}{D_h}, \frac{l_i}{D_h}, \frac{l_o}{D_h}, \frac{L_i}{D_h}, \frac{L_o}{D_h}, \frac{a}{D_h}, \frac{b}{D_h}, \frac{x}{D_h}, \frac{y}{D_h}, \frac{z}{D_h}, \theta\right) \quad (3.7)$$

Pada penelitian ini yang menjadi variabel tetap adalah

$\frac{r_m}{D_h}, \frac{r_i}{D_h}, \frac{r_o}{D_h}, \frac{l_i}{D_h}, \frac{l_o}{D_h}, \frac{L_i}{D_h}, \frac{L_o}{D_h}, \frac{a}{D_h}, \frac{b}{D_h}$  dan  $\frac{x}{D_h}$  sehingga

$$\frac{u}{U_{ref}} = f_1\left(\frac{\mu}{\rho U_{ref} D_h}, \theta, \frac{y}{D_h}, \frac{z}{D_h}\right) \quad (3.8)$$

dan untuk kecepatan tak berdimensi ( $\frac{u}{U_{ref}}$ ) pada *square ducting* adalah sebagai berikut :

$$\frac{u}{U_{ref}} = f_2\left(Re_{D_h}, \theta, \frac{y}{D_h}, \frac{z}{D_h}\right) \quad (3.9)$$

Untuk menghitung profil kecepatan dengan menggunakan *Reynolds number* konstan yaitu  $7,88 \times 10^4$ .

### 3.4 Langkah-Langkah Validasi

Ada beberapa langkah validasi yang perlu dilakukan sebelum pengambilan data, yaitu :

#### 3.4.1 Alat yang digunakan

**Peralatan yang dipergunakan pada proses kalibrasi :**

- Manometer
- Pressure Transducer
- Data Aquisisi DAQ PRO 5300
- Pitot Static Tube

**3.4.2 Validasi Tekanan Dinamis**

1. Pemasangan instalasi untuk keadaan *free stream* dengan sudut 2 buah damper  $0^\circ$ .
2. *Pitot static tube* dipasang pada dinding saluran udara yang tersambung pada *manometer* dan *transducer*.
3. Pengaturan *inverter* dari 0 – 50 Hz dengan interval 5 Hz.
4. Diambil data *manometer* dan *pressure transducer* untuk tekanan dinamik.
5. Dari *manometer* didapatkan  $\Delta h$  (mm) dan dari data akuisisi didapatkan *Voltage (Volt)*.
6. Data-data tersebut dibuat grafik  $\Delta h$  *manometer* vs *voltage (Volt)* sehingga diketahui juga hubungan dengan sebuah formula.

**3.4.3 Validasi Tekanan Dinding**

1. Pemasangan instalasi untuk keadaan *free stream* dengan sudut 2 buah damper  $0^\circ$ .
2. *Wall pressure tap* pada *inlet upstream* dihubungkan pada *manometer* dan *transducer*.
3. Pengaturan *inverter* dari 0 – 50 Hz dengan interval 5 Hz.
4. Diambil data *manometer* dan *pressure transducer* untuk tekanan statis dinding.
5. Dari *manometer* didapatkan  $\Delta h$  (mm) dan dari data akuisisi didapatkan *Voltage (Volt)*.
6. Data-data tersebut dibuat grafik  $\Delta h$  *manometer* vs *voltage (Volt)* sehingga diketahui juga hubungan dengan sebuah formula.



### 3.5 Prosedur Pengambilan Data

#### 3.5.1 Pengambilan Data Kuantitatif

Parameter yang diukur pada penelitian ini meliputi tekanan stagnasi dan tekanan statis. Sebelum melakukan pengambilan data maka perlu dilakukan pengukuran suhu ruangan terlebih dahulu. Masing-masing pengukuran memiliki prosedur pengambilan data yang berbeda dan akan dijelaskan sebagai berikut:

1) Prosedur pengukuran tekanan dinamis

Prosedur pengukuran tekanan dinamis adalah sebagai berikut:

- a) *Test section dipersiapkan.*
  - b) *Pitot tube* dipasang pada posisi yang ingin diukur.
  - c) *Pitot tube* dihubungkan dengan *pressure transducer* dengan menggunakan selang kapiler.
  - d) Posisi *pitot tube* diatur pada titik awal pengukuran pada jarak  $x_m/l_m = 0.31$  dan pada jarak  $r_o/b_x \approx 1$  artinya ujung *pitot tube* sebisa mungkin di dekatkan pada *dinding outer* saluran udara.
  - e) Frekuensi inverter diatur untuk mendapatkan putaran *blower* yang sesuai kebutuhan.
  - f) *Voltage* dari *pressure transducer* pada tekanan stagnasi pada dicatat.
  - g) *Blower* dimatikan
  - h) *Pitot tube* digeser searah horisontal mendekati sisi *inner duct*.
  - i) Langkah e sampai h diulangi sampai titik tekanan stagnasi terakhir yang telah ditentukan sebelumnya.
- 2) Prosedur pengukuran tekanan statis adalah sebagai berikut:
- a) *Test section dipersiapkan.*
  - b) *Wall pressure tap* dihubungkan ke *pressure transducer* dengan selang kapiler.

- c) Frekuensi inverter diatur untuk mendapatkan putaran *blower* yang sesuai kebutuhan.
- d) Data *voltage* dari *pressure transducer* dicatat.
- e) Selang kapiler *pressure transducer* dilepas dari *wall pressure tap* pertama kemudian dihubungkan dengan selang kapiler untuk *wall pressure tap* pada titik *section* selanjutnya.
- f) Langkah c) sampai e) diulangi sampai didapatkan data pada posisi *pressure tap* yang terakhir pada posisi 16D<sub>h</sub> dari *inlet downstream straight channel*.

### 3.5.2 Pengolahan Data Kuantitatif

Pengolahan data dilakukan dengan membuat sebuah contoh perhitungan. Beberapa data awal yang diperlukan untuk melakukan proses perhitungan adalah:

- Diameter hidrolis ( $D_h$ ) : 125 mm
- Panjang *downstream straight channel* : 2125 mm
- Panjang *inlet upstream* sampai *downstream*
  - inner wall* ( $l_i$ ) : 3169,375 mm
  - Outer wall* ( $l_o$ ) : 3267,5 mm
- Sudut *inclined manometer* ( $\theta$ ) : 15°
- *Specific Gravity kerosene* ( $SG_{kerosene}$ ) : 0,827
- Percepatan Gravitasi ( $g$ ) : 9,81 m/s<sup>2</sup>
- Temperatur ruangan konstan ( $T$ ) : 28°C
- Massa jenis udara pada T = 28°C ( $\rho_{ud}$ ) : 1,182 kg/m<sup>3</sup>
- Viskositas kinematis udara pada T = 28°C ( $\nu$ ) : 1,585x10<sup>-5</sup> m<sup>2</sup>/s
- Massa jenis air pada T = 28°C ( $\rho_{H2O}$ ) : 996,4 kg/m<sup>3</sup>

#### 1) Perhitungan untuk *Reynolds Number*

Pada eksperimen ini digunakan angka *Reynolds* yang didapat melalui persamaan 3.10 didapatkan kecepatan awal *centrifugal fan* diatur pada *Reynolds Number* 7,88 x 10<sup>4</sup>.

$$Re_{DH} = \frac{\rho_{ud} \cdot U_{ref} \cdot D_h}{\mu} = \frac{U_{ref} \cdot D_h}{\nu} \quad (3.10)$$

Dimana:  $\rho_{ud}$  : massa jenis udara  
 $\nu$  : viskositas kinematis udara pada  $T = 28^\circ\text{C}$   
 $\mu$  : viskositas absolut udara pada  $T = 28^\circ\text{C}$   
 $U_{ref}$  : kecepatan freestream pada *inlet upstream straight channel*  
 $D_h$  : diameter hidrolik ducting

*Fan* yang digunakan pada eksperimen ini adalah *centrifugal fan*. Untuk mendapatkan kecepatan awal ( $U_{ref}$ ) sebesar 10 m/s dilakukan pengaturan frekuensi pada inverter secara manual. Dengan kalibrasi validasi tekanan dinamik pada saluran *upstream straight channel* melalui *inclined manometer* untuk pengukuran nilai  $\Delta h$ . Nilai  $\Delta h$  diukur dari frekuensi 0 Hz sampai 50 Hz sehingga akan mendapatkan frekuensi dengan nilai  $\Delta h$  pada kecepatan udara masuk 10 m/s dengan *Reynolds Number*  $7,88 \times 10^4$ . Pengukuran kecepatan aliran masuk menggunakan persamaan 3.11 sebagai berikut:

$$P_{dinamis} = \rho_{kerosene} \cdot g \cdot \Delta h \quad (3.11)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \cdot \rho_{ud} \cdot (U_{ref})^2 &= SG_{kerosene} \cdot \rho_{H2O} \cdot g \cdot 2 \cdot \Delta y \sin 15^\circ \\ U_{ref}^2 &= \frac{4 \cdot SG_{kerosene} \cdot \rho_{H2O} \cdot g \cdot \Delta y \sin 15^\circ}{\rho_{udara}} \\ U_{ref} &= \sqrt{\frac{4 \cdot SG_{kerosene} \cdot \rho_{H2O} \cdot g \cdot \Delta y \sin 15^\circ}{\rho_{udara}}} \quad (3.12) \end{aligned}$$

Dimana:  $P_{dinamis}$  : ( $P_{stagnasi} - P_{statis}$ ) tekanan dinamis diukur dengan *pitot tube* ( $\text{N/m}^2$ )  
 $P_{kerosene}$  : massa jenis *kerosene* pada  $28^\circ\text{C}$  ( $\text{kg/m}^3$ )  
 $\rho_{udara}$  : massa jenis udara pada  $28^\circ\text{C}$  ( $\text{kg/m}^3$ )  
 $g$  : percepatan gravitasi ( $\text{m/s}^2$ )  
 $\Delta h$  : perbedaan fluida pada manometer (m)  
 $U_{ref}$  : kecepatan freestream pada *inlet*

$$\begin{aligned}
 SG_{\text{kerosene}} &: \text{upstream (m/s)} \\
 &: \text{Specific Gravity kerosene pada } 28^\circ\text{C} \\
 \rho_{H_2O} &: \text{massa jenis air pada } 28^\circ\text{C} \\
 &: (\text{kg/m}^3)
 \end{aligned}$$

## 2) Perhitungan kecepatan lokal

Profil kecepatan diukur pada 16 test section sepanjang *downstream straight channel* dengan variasi pembukaan sudut damper dan pada *Reynolds Number*  $7,88 \times 10^4$ . Posisi pengukuran dilakukan secara horizontal dari sisi *outer wall ducting*. Perhitungan profil kecepatan pada setiap *section* sepanjang *downstream straight channel* ditulis sesuai persamaan 3.13 sebagai berikut:

$$u = \sqrt{\frac{2 \cdot (P_{\text{stagnasi}} - P_{\text{statis}})}{\rho_{\text{udara}}}} \quad (3.13)$$

$$u = \sqrt{\frac{2 \cdot (P_{\text{dinamis}})}{\rho_{\text{udara}}}} \quad (3.14)$$

dimana :  $u$  : kecepatan lokal (m/s)  
 $P_{\text{dinamis}}$  :  $(P_{\text{stagnasi}} - P_{\text{statis}})$  tekanan dinamis diukur dengan pitot tube.  
 $\rho_{\text{udara}}$  : massa jenis udara pada  $T = 28^\circ\text{C}$

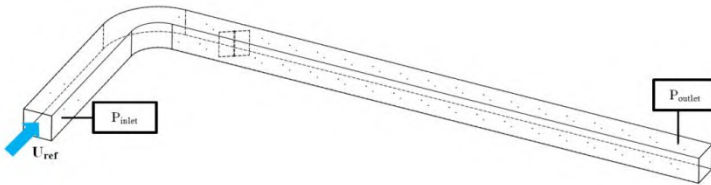
## 3) Perhitungan Pressure Drop ( $\Delta p$ )

*Pressure drop* adalah selisih tekanan *inlet* pada *upstream straight channel* dan tekanan *outlet* pada *downstream straight channel (section 16)*. Sisi *inner* dan *outer* mempunyai tekanan *inlet* dan *outlet* yang hampir sama. Perhitungan  $P_{\text{inlet}}$  dan  $P_{\text{outlet}}$  adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 \Delta P &= P_{\text{inlet}} - P_{\text{outlet}} \\
 \Delta P &= (\rho_{\text{kerosene}} \cdot g \cdot \Delta h_{\text{inlet}}) - (\rho_{\text{kerosene}} \cdot g \cdot \Delta h_{\text{outlet}}) \\
 \Delta P &= (SG_{\text{kerosene}} \cdot \rho_{H_2O} \cdot g \cdot \Delta h_{\text{inlet}}) - \\
 &\quad (SG_{\text{kerosene}} \cdot \rho_{H_2O} \cdot g \cdot \Delta h_{\text{outlet}}) \quad (3.15)
 \end{aligned}$$

$$C_p = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2} \rho \bar{V}^2} \quad (3.16)$$

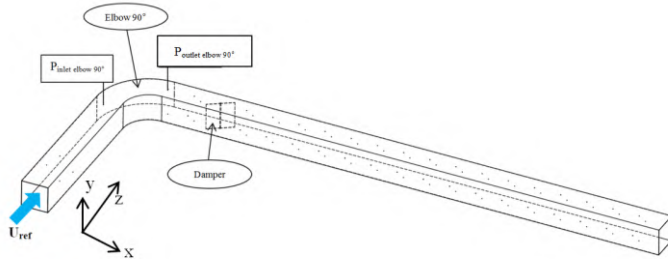
dimana :  $\Delta P$  = Pressure drop (N/m<sup>2</sup>)  
 $P_{inlet}$  = Tekanan *inlet* pada *upstream straight channel* (N/m<sup>2</sup>)  
 $P_{outlet}$  = Tekanan *outlet* pada *downstream (section 16)* (N/m<sup>2</sup>)  
 $C_p$  = Pressure Coefficient



Gambar 3.11 Lokasi perhitungan untuk *pressure drop*

*Pressure drop* pada penelitian ini akan dilakukan dengan variasi *Reynolds number*  $3,94 \times 10^4 < Re_{Dh} < 10^5$  (kecepatan udara 5 m/s sampai 12 m/s dengan kenaikan kecepatan 1 m/s) dengan variasi tanpa damper, sudut damper ganda 0°, sudut damper ganda 10°, 20° dan 30° membentuk *nozzle* dan sudut damper ganda 10°, 20° dan 30° membentuk *diffusor*

#### 4) Perhitungan *Koefisien Losses elbow 90°* ( $K_{elbow\ 90^\circ}$ )



Gambar 3.12. Lokasi perhitungan untuk *koefisien losses elbow 90°*

Eksperimen ini menggunakan *duct elbow 90°* berpenampang *square* dengan dipasang sebuah *damper* pada jarak  $2D_h$  dari *outlet elbow 90°*. Pemasangan *elbow 90°* akan mengakibatkan *koefisien losses elbow 90°* pada saluran. *Koefisien losses elbow 90°* adalah nilai konstanta yang menentukan besar kecil *head loss minor* akibat pemasangan sebuah *elbow 90°* pada sebuah saluran udara. Pada eksperimen ini, *koefisien losses elbow 90°* didapatkan dari data perbedaan tekanan dari *pressure tap inlet elbow 90°* dan *outlet elbow 90° (section -2)* seperti pada gambar 3.12

$$P_{outlet\ elbow\ 90^\circ} - P_{inlet\ elbow\ 90^\circ} = K_{elbow\ 90^\circ} \frac{\bar{V}^2 \times \rho_{udara}}{2} \quad (3.17)$$

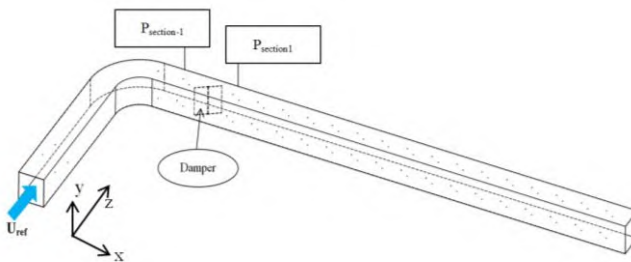
$$K_{elbow\ 90^\circ} = \frac{(P_{outlet\ elbow\ 90^\circ} - P_{inlet\ elbow\ 90^\circ}) \times 2}{\bar{V}^2 \times \rho_{udara}} \quad (3.18)$$

dimana:  $P_{outlet\ elbow\ 90^\circ}$  : Tekanan pada *outlet elbow 90° (section -2)* (N/m<sup>2</sup>)

$P_{inlet\ elbow\ 90^\circ}$	: Tekanan pada <i>inlet elbow 90°</i> (N/m <sup>2</sup> )
$\bar{V}^2$	: Kecepatan udara masuk pada upstream (m/s)
$\rho_{udara}$	: massa jenis udara pada 28°C (kg/m <sup>3</sup> )
$K_{elbow\ 90^\circ}$	: <i>koefisien losses elbow 90°</i>

*Koefisien losses elbow 90°* pada penelitian ini akan dilakukan dengan variasi *Reynolds number*  $3,94 \times 10^4 < Re_{Dh} < 10^5$  (kecepatan udara 5 m/s sampai 12 m/s dengan kenaikan kecepatan 1 m/s) dengan variasi sudut bukaan *damper* ganda 0°, sudut bukaan *damper* ganda 10°, 20° dan 30° membentuk *nozzle* dan sudut bukaan *damper* ganda 10°, 20° dan 30° membentuk *diffusor*

##### 5) Perhitungan Koefisien Losses Damper ( $K_{damper}$ )



Gambar 3.13. Lokasi perhitungan untuk *koefisien losses damper*

Eksperimen ini menggunakan *duct elbow 90°* berpenampang *square* dengan dipasang sebuah *damper* pada jarak  $2D_h$  dari *outlet elbow 90°*. Pemasangan *damper* akan mengakibatkan *koefisien losses damper* pada saluran. *Koefisien losses damper* adalah nilai konstanta yang menentukan besar kecil *head loss minor* akibat pemasangan sebuah

damper. Pada eksperimen ini, *koefisien losses damper* didapatkan dari data perbedaan tekanan dari *pressure tap inlet* sebelum *damper (section -1)* dan sesudah *damper (section 1)* yang terdapat pada *downstream straight channel* seperti pada gambar 3.13.

$$P_1 - P_{-1} = K_{damper} \frac{\bar{V}^2 \times \rho_{udara}}{2} \quad (3.19)$$

$$K_{damper} = \frac{(P_1 - P_{-2}) \times 2}{\bar{V}^2 \times \rho_{udara}} \quad (3.20)$$

- dimana:  $P_{-1}$  : Tekanan pada *downstream (section -1)* (N/m<sup>2</sup>)  
 $P_1$  : Tekanan pada *downstream (section 1)* (N/m<sup>2</sup>)  
 $\bar{V}^2$  : Kecepatan udara masuk pada upstream (m/s)  
 $\rho_{udara}$  : massa jenis udara pada 28°C (kg/m<sup>3</sup>)  
 $K_{damper}$  : *koefisien losses damper*

*Koefisien losses damper* pada penelitian ini akan dilakukan dengan variasi *Reynolds number*  $3,94 \times 10^4 < Re_{Dh} < 10^5$  (kecepatan udara 5 m/s sampai 12 m/s dengan kenaikan kecepatan 1 m/s) dengan variasi sudut bukaan *damper* ganda 0°, sudut bukaan *damper* ganda 10°, 20° dan 30° membentuk *nozzle* dan sudut bukaan *damper* ganda 10°, 20° dan 30° membentuk *diffusor*

## 6). Intensitas Turbulensi

Pada studi eksperimen ini akan diberikan informasi tentang intensitas turbulensi yang terjadi pada aliran yang diambil pada sisi inlet upstream. *Turbulensi* dapat didefinisikan sebagai perubahan kecepatan yang sering terjadi dalam waktu singkat berskala kecil dan terjadi secara acak. Dengan kata lain, ketika kecepatan aliran udara dan atau arah pergerakannya berubah dengan cepat, maka pada saat itu dapat dikatakan telah terjadi turbulensi udara (Wagtendonk,



2003). Pengambilan data *Intensitas turbulensi* menggunakan *pitot static tube* yang dipasang tepat di *centerline* pada sisi *upstream*. Analisa *intensitas turbulensi* ini berdasarkan sinyal kecepatan yang diambil oleh *pitot tube*. Sehingga didapatkan fluktuatif kecepatan disetiap detiknya. *Intensitas turbulensi* (*IT*) dirumuskan sebagai berikut:

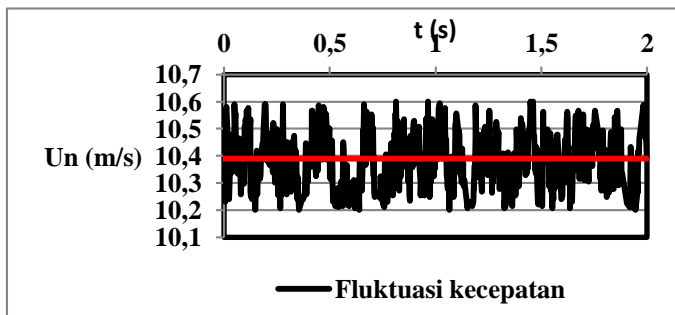
$$IT = \frac{u'}{\bar{U}} \times 100\%$$

$$u' = \sqrt{\frac{\sum(\bar{U} - U_n)^2}{n-1}}$$

dimana :

- $IT$  : Intensitas turbulensi
- $U_n$  : Kecepatan pada waktu tertentu (kecepatan lokal) (m/s)
- $\bar{U}$  : Kecepatan rata-rata (m/s)
- $u'$  : Standar deviasi fluktuasi kecepatan (m/s)

Pada studi eksperimen telah dilakukan pengambilan *intensitas turbulensi* pada sisi *upstream* dimana pengambilan dilakukan pada jarak  $x/D_h = 1$  dari sisi *inlet* pada *centerline* dengan variasi tanpa *dampers* ganda. Pengambilan *intensitas turbulensi* menggunakan kecepatan 10 m/s atau pada *Reynolds number*  $7.88 \times 10^4$  dan didapatkan 1001 *sample* dimana akan ditunjukkan pada lampiran. Dari 1001 *sample* yang didapat diperoleh hasil :



Gambar 3.14 *Fluktuasi kecepatan pada inlet upstream*

Pada gambar diatas merupakan sinyal fluktuasi kecepatan aliran udara pada ducting dengan variasi tanpa guide vane dan tanpa dipasang damper ganda yang diambil pada  $Re = 7.88 \times 10^4$  dan memiliki rata – rata kecepatan (  $\bar{U}$  ) sebesar 10.3762. Dengan 1001 data yang diambil tiap detiknya, dari perhitungan diperoleh standard deviasi 0.134917

$$\begin{aligned}\bar{U} &= 10.38 \text{ m/s} \\ u' &= 0.088 \text{ m/s} \\ IT &= \frac{0.088}{10.38} \times 100\% = 0.847 \%\end{aligned}$$

Pada perhitungan diatas didapat bahwa pada centerline sisi upstream dengan jarak  $x/D_h = 1$  mempunyai *intensitas turbulensi* sebesar 0.847 % pada *Reynolds number*  $7.88 \times 10^4$  atau pada kecepatan 10 m/s

### 3.6 Urutan Langkah Penelitian

Pada tabel 3.2 dijelaskan urutan langkah penelitian yang akan dilakukan. Urutan langkah penelitian adalah sebagai berikut :

**Tabel 3.2 Urutan langkah penelitian**

1. Profil kecepatan bidang horizontal pada $Re_{Dh}$ $7,88 \times 10^4$	Profil kecepatan dengan tanpa damper
	Profil kecepatan dengan sudut pembukaan damper ganda $0^\circ$ , $30^\circ$ bentuk <i>nozzle</i> dan $30^\circ$ bentuk <i>diffusor</i>
2. Profil kecepatan bidang vertikal pada $Re_{Dh}$ $7,88 \times 10^4$	Profil kecepatan dengan tanpa damper
	Profil kecepatan dengan sudut pembukaan damper ganda $0^\circ$ , $30^\circ$ bentuk <i>nozzle</i> dan $30^\circ$ bentuk <i>diffusor</i>

3. <i>Pressure drop</i> dengan variasi $Re_{Dh}$ $3,94 \times 10^4 < Re_{Dh} < 10^5$	<i>Pressure drop</i> dengan tanpa <i>damper</i>  <i>Pressure drop</i> dengan sudut pembukaan <i>damper</i> ganda $0^\circ$ , sudut bukaan <i>damper</i> ganda $10^\circ$ , $20^\circ$ , $30^\circ$ membentuk <i>nozzle</i> dan sudut bukaan <i>damper</i> ganda $10^\circ$ , $20^\circ$ , $30^\circ$ membentuk <i>diffusor</i>
4 <i>Koefisien losess elbow</i> $90^\circ$ dengan variasi $3,94 \times 10^4 < Re_{Dh} < 10^5$	<i>Koefisien losess elbow</i> $90^\circ$ dengan sudut pembukaan <i>damper</i> ganda $0^\circ$ , sudut bukaan <i>damper</i> ganda $10^\circ$ , $20^\circ$ , $30^\circ$ membentuk <i>nozzle</i> dan sudut bukaan <i>damper</i> ganda $10^\circ$ , $20^\circ$ , $30^\circ$ membentuk <i>diffusor</i>
5 <i>Koefisien losess damper</i> dengan variasi $3,94 \times 10^4 < Re_{Dh} < 10^5$	<i>Koefisien losess damper</i> dengan sudut pembukaan <i>damper</i> ganda $0^\circ$ , sudut bukaan <i>damper</i> ganda $10^\circ$ , $20^\circ$ , $30^\circ$ membentuk <i>nozzle</i> dan sudut bukaan <i>damper</i> ganda $10^\circ$ , $20^\circ$ , $30^\circ$ membentuk <i>diffusor</i>

### 3.7 Langkah Pengambilan Data

#### 3.7.1 Langkah pengambilan data profil kecepatan

Urutan proses pengambilan data profil kecepatan pada variasi bukaan sudut *double damper* yang disajikan dalam bentuk tabel

**Tabel 3.3 Langkah pengambilan data profil kecepatan**

<b>Pengambilan profil kecepatan dengan variasi bukaan sudut <i>double damper</i></b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Mempersiapkan instalasi dan alat ukur yang digunakan untuk pengambilan data profil kecepatan (<i>pitot tube</i>, <i>pressure transducer</i> 1 <i>watercoloumb</i> , DAQ Pro)</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Dua buah <i>damper</i> dipasang dengan sudut <math>0^\circ</math> (posisi fully open)</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Melakukan kalibrasi alat ukur</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Pengukuran temperature ruangan saat dilaksanakan pengambilan data</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Penempatan <i>pitot tube</i> pada <i>center line ducting</i></li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● <i>Pitot tube</i> memiliki 2 saluran yaitu saluran <i>stagnasi</i> dan <i>statis</i> dimana untuk mencari kecepatan pada keadaan dinamis. Saluran stagnasi dihubungkan pada <i>pressure transducer high</i> sedangkan saluran statis dihubungkan pada <i>pressure transducer low</i>.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● <i>Input</i> profil kecepatan yang diterima oleh <i>pressure transducer</i> akan dikonversikan dalam voltage yang akan ditampilkan pada display DAQ Pro</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Profil kecepatan diukur pada kecepatan 10 m/s yang mempunyai <i>Reynolds Number</i> <math>7,88 \times 10^4</math></li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Profil kecepatan diambil pada 16 <i>section</i> sepanjang <i>downstream</i> dan lokasi pengambilan data seperti ditunjukkan pada table 3.1 . Setiap <i>section</i> memiliki 17 titik</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Pengolahan dan analisa data dilakukan setelah pengambilan data selesai dilakukan</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Profil kecepatan ditampilkan dalam bentuk grafik pada tiap <i>section</i> - nya</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Ulangi dengan variasi bukaan sudut <i>double damper</i> <math>30^\circ</math> yang membentuk <i>nozzle</i> dengan langkah – langkah yang sama</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Ulangi dengan variasi bukaan sudut <i>double damper</i> <math>30^\circ</math> yang membentuk <i>diffusor</i> dengan langkah – langkah yang sama</li> </ul>

### 3.7.2 Langkah pengambilan data *pressure drop*

Urutan proses pengambilan data *pressure drop* pada variasi bukaan sudut *double damper* dengan penambahan  $10^\circ$  yang disajikan dalam bentuk tabel

**Tabel 3.4 Langkah pengambilan data *pressure drop***

<b>Pengambilan <i>pressure drop</i> dengan variasi bukaan sudut <i>double damper</i></b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Mempersiapkan instalasi dan alat ukur yang digunakan untuk pengambilan data profil kecepatan (wall pressure tap, pressure transducer 3 watercoloumb , DAQ Pro)</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Dua buah damper dipasang dengan sudut <math>0^\circ</math> (posisi fully open)</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Melakukan kalibrasi alat ukur</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Pengukuran temperature ruangan saat dilaksanakan pengambilan data</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Pemasangan wall pressure tap pada titik yang telah ditentukan, dalam eksperimen ini akan diukur perbedaan tekanan statis pada sisi inlet dan outlet (<i>pressure drop</i>).</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Pengukuran dilakukan secara bergantian antara sisi inlet dan outlet . 4 saluran pada tiap – tiap penampang akan dihubungkan pada connector untuk menggabungkan keempat saluran tersebut dan memiliki 1 output yang dihubungkan pada <i>pressure transducer low</i> (untuk <i>pressure transducer high</i> disumbat).</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Input tekanan yang diterima oleh <i>pressure transducer</i> akan dikonversikan dalam voltage yang akan ditampilkan pada display DAQ Pro</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● <i>Pressure drop</i> diukur dengan 8 variasi kecepatan dari 5 – 12 m/s dengan rentang <i>Reynolds Number</i> <math>3,94 \times 10^4 &lt; Re_{Dh} &lt; 9,46 \times 10^4</math></li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Pengolahan dan analisa data dilakukan setelah pengambilan data selesai dilakukan</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● <i>Pressure drop</i> ditampilkan dalam bentuk grafik <math>C_p</math></li> </ul>

( <i>coefficient pressure</i> ) fungsi variasi <i>Reynolds number</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Ulangi dengan variasi bukaan sudut <i>double damper</i> 10° 20° dan 30° yang membentuk <i>nozzle</i> dan membentuk <i>diffusor</i> dengan langkah – langkah yang sama</li> </ul>

### 3.7.3 Langkah pengambilan data koefisien losses damper

**Tabel 3.5 Langkah pengambilan data koefisien losses damper**

<b>Pengambilan koefisien losses damper variasi bukaan sudut <i>double damper</i></b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Mempersiapkan instalasi dan alat ukur yang digunakan untuk pengambilan data profil kecepatan (wall pressure tap, pressure transducer 3 watercoloumb , DAQ Pro)</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Dua buah damper dipasang dengan sudut 0° (posisi fully open)</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Melakukan kalibrasi alat ukur</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Pengukuran temperature ruangan saat dilaksanakan pengambilan data</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Pemasangan wall pressure tap pada titik yang telah ditentukan, dalam eksperimen ini akan diukur perbedaan tekanan statis pada sisi inlet dan outlet (pressure drop).</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Pengukuran dilakukan secara bergantian antara sisi inlet dan outlet . 4 saluran pada tiap penampang akan dihubungkan pada connector untuk menggabungkan keempat saluran tersebut dan memiliki 1 output yang dihubungkan pada <i>pressure transducer low</i> (untuk <i>pressure transducer high</i> disumbat). <i>Inlet</i> berada pada <i>wall pressure tap</i> sebelum damper dan outlet berada pada <i>wall pressure tap</i> setelah damper</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Input yang diterima oleh <i>pressure transducer</i> akan dikonversikan dalam voltage yang akan ditampilkan pada display DAQ Pro</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● <i>Koefisien losses damper</i> diukur dengan 8 variasi kecepatan dari 5 – 12 m/s dengan rentang <i>Reynolds</i></li> </ul>

$Number\ 3,94 \times 10^4 < Re_{Dh} < 9,46 \times 10^4$
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Pengolahan dan analisa data dilakukan setelah pengambilan data selesai dilakukan</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● <i>Koefisien losses damper</i> ditampilkan dalam bentuk grafik antara masing – masing bukaan <i>damper</i> ganda berbentuk <i>nozzle</i> dan bukaan <i>damper</i> ganda berbentuk <i>diffusor</i></li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Ulangi dengan variasi bukaan sudut <i>double damper</i> 10° 20° dan 30° yang membentuk <i>nozzle</i> dengan langkah – langkah yang sama</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Ulangi dengan variasi bukaan sudut <i>double damper</i> 10° 20° dan 30° yang membentuk <i>diffusor</i> dengan langkah – langkah yang sama</li> </ul>

### 3.7.4 Langkah pengambilan data koefisien losses elbow 90°

**Tabel 3.6 Langkah pengambilan data koefisien losses elbow 90°**

<b>Pengambilan koefisien losses elbow 90° dengan variasi bukaan sudut double damper</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Mempersiapkan instalasi dan alat ukur yang digunakan untuk pengambilan data profil kecepatan (<i>wall pressure tap, pressure transducer 3 watercoloumb , DAQ Pro</i>)</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Dua buah <i>damper</i> dipasang dengan sudut 0° (posisi <i>fully open</i>)</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Melakukan kalibrasi alat ukur</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Pengukuran temperature ruangan saat dilaksanakan pengambilan data</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Pemasangan <i>wall pressure tap</i> pada titik yang telah ditentukan, dalam eksperimen ini akan diukur perbedaan tekanan <i>statis</i> pada sisi <i>inlet</i> dan <i>outlet</i></li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Pengukuran dilakukan secara bergantian antara sisi <i>inlet</i> dan <i>outlet</i> . 4 saluran pada tiap penampang akan dihubungkan pada <i>connector</i> untuk menggabungkan</li> </ul>

<p>keempat saluran tersebut dan memiliki 1 <i>output</i> yang dihubungkan pada <i>pressure transducer low</i> (untuk <i>pressure transducer high</i> disumbat). <i>Inlet</i> berada pada <i>wall pressure tap</i> sebelum <i>elbow 90°</i> dan <i>outlet</i> berada pada <i>wall pressure tap</i> setelah <i>elbow 90°</i></p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● <i>Input</i> yang diterima oleh <i>pressure transducer</i> akan dikonversikan dalam <i>voltage</i> yang akan ditampilkan pada display DAQ Pro</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● <i>Koefisien losses elbow 90°</i> diukur dengan 8 variasi kecepatan dari 5 – 12 m/s dengan rentang <i>Reynolds Number</i> <math>3,94 \times 10^4 &lt; Re_{Dh} &lt; 9,46 \times 10^4</math></li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Pengolahan dan analisa data dilakukan setelah pengambilan data selesai dilakukan</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● <i>Koefisien losses elbow 90°</i> ditampilkan dalam bentuk grafik antara masing – masing bukaan <i>damper</i> ganda berbentuk <i>nozzle</i> dan bukaan <i>damper</i> ganda berbentuk <i>diffusor</i></li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Ulangi dengan variasi bukaan sudut <i>double damper 10° 20° dan 30°</i> yang membentuk <i>nozzle</i> dengan langkah – langkah yang sama</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Ulangi dengan variasi bukaan sudut <i>double damper 10° 20° dan 30°</i> yang membentuk <i>diffusor</i> dengan langkah – langkah yang sama</li> </ul>



*( Halaman ini sengaja dikosongkan )*

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini membahas hasil studi eksperimen yang telah dilakukan serta akan ditampilkan data dan grafik dari hasil studi eksperimen aliran yang melewati square ducting (saluran berpenampang bujursangkar) dengan elbow 90° dengan variasi bukaan sudut damper ganda. Terdapat beberapa sub-bab yang akan membahas hasil dan analisa studi eksperimen diantaranya profil kecepatan aliran yang melewati square-duct pada sisi *inlet upstream straight channel* dengan pengambilan secara horizontal dan vertikal , profil kecepatan pada penampang tegak lurus dengan damper (*horizontal cross section*) pada section yang telah ditentukan, profil kecepatan pada penampang sejajar dengan damper (*vertikal cross section*) pada section yang telah ditentukan, *pressure drop*, *koefisien losses elbow 90°* dan *koefisien losses double damper* dengan variasi *Reynolds number*.

Profil kecepatan aliran yang di amati pada bidang *vertikal* dan *horizontal* pada studi eksperimen merupakan variasi bukaan sudut *damper* ganda dengan sudut *damper* 0°, 30° membentuk *diffusor* dan 30° membentuk *nozzle* dengan profil kecepatan model uji tanpa *damper* pada kecepatan 10 m/s (*Reynolds number*  $7.88 \times 10^4$ ). *Pressure drop* yang terjadi pada saluran udara akan di amati pada variasi *Reynolds number*  $3,94 \times 10^4 < Re_{Dh} < 9,46 \times 10^4$  (kecepatan udara 5 m/s sampai 12 m/s dengan kenaikan kecepatan 1 m/s) dengan variasi tanpa *damper* . Begitu juga dengan pemasangan *elbow 90°* dan *damper* ganda akan mengakibatkan losses yang akan digambarkan dan dihitung *koefisien losses damper* dan *koefisien losses elbow 90°* pada *square duct* dengan *elbow 90°* dengan variasi *Reynolds number*  $3,94 \times 10^4 < Re_{Dh} < 9,46 \times 10^4$  (kecepatan udara 5 m/s sampai 12 m/s dengan kenaikan kecepatan 1 m/s) . Pengamatan dan pengambilan data *pressure drop* , *koefisien losses damper* dan *koefisien elbow 90°* dilakukan dengan variasi *Reynolds number* yang telah disebutkan dan variasi bukaan sudut damper ganda adalah 0°, 10°, 20° dan 30°

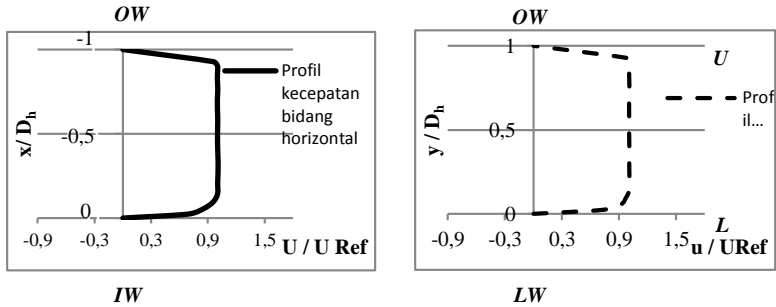
dengan masing – masing variasi bukaan sudut membentuk *diffusor* dan membentuk *nozzle*

*Velocity profile* dalam bentuk bilangan tak berdimensi yang bernilai dari nol sampai satu pada absis sedangkan besarnya profil kecepatan ditunjukkan oleh perbandingan  $\frac{u}{U_{ref}}$  pada ordinat. Absis pada grafik menunjukkan posisi titik dimana nilai  $z/D_h = 0$  adalah posisi yang searah dengan sisi *inner downstream straight channel* dan  $z/D_h = 1$  adalah posisi yang searah dengan sisi *outer downstream straight channel*. Selanjutnya akan dibahas penjelasan analisa tentang bagaimana perilaku aliran dua dimensi sepanjang *downstream straight channel* berupa grafik *velocity profile* pada bidang vertikal dengan tanpa *damper* dan sudut bukaan damper. *Velocity profile* dalam bentuk bilangan tak berdimensi yang bernilai dari nol sampai satu pada absis sedangkan besarnya profil kecepatan ditunjukkan oleh perbandingan  $\frac{u}{U_{ref}}$  pada ordinat. Absis pada grafik menunjukkan posisi titik dimana nilai  $y/D_h = 0$  adalah posisi yang searah dengan sisi *lower downstream straight channel* dan  $y/D_h = 1$  adalah posisi yang searah dengan sisi *upper downstream straight channel*

#### **4.1 Perbandingan Profil Kecepatan Bidang Horizontal dan Vertikal pada Sisi *Inlet Upstream Straight Channel*** **$Re_{Dh} = 7,88 \times 10^4$**

Profil kecepatan pada sisi *upstream straight channel* digunakan sebagai acuan untuk menentukan gambaran proses *recovery* profil kecepatan daerah *downstream straight channel* pada *section* yang telah ditentukan. Pada gambar 4.1.(a) menunjukkan perilaku aliran dua pada sisi *upstream straight channel* berupa grafik *velocity profile* pada bidang horizontal. *Velocity profile* dalam bentuk bilangan tak berdimensi yang bernilai dari nol sampai minus satu pada absis sedangkan

besarnya profil kecepatan ditunjukkan oleh perbandingan  $\frac{u}{U_{ref}}$  pada ordinat. Absis pada grafik menunjukkan posisi titik dimana nilai  $x/D_h = 0$  adalah posisi yang searah dengan sisi *inner upstream straight channel* dan  $x/D_h = -1$  adalah posisi yang searah dengan sisi *outer upstream straight channel*.



(a) (b)  
 OW : Outer Wall IW : Inner Wall UW : Upper Wall LW : Lower Wall

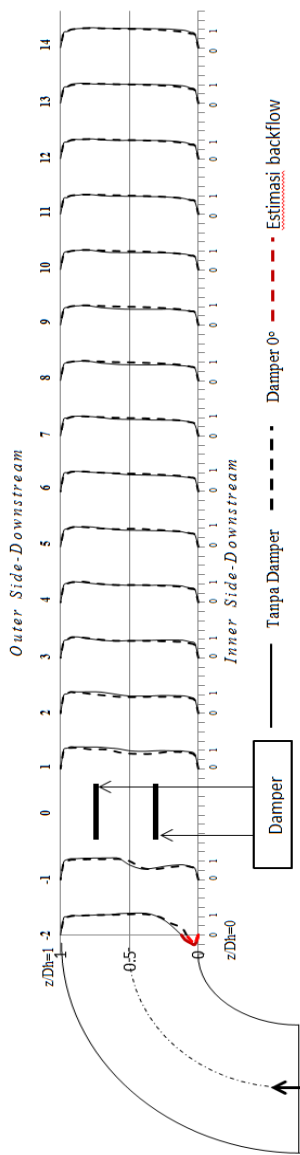
**Gambar 4.1.** Grafik *velocity profile* (a) bidang horizontal sisi *upstream*  
 (b) bidang vertikal sisi *upstream*

Pada gambar 4.1.(b) menunjukkan perilaku aliran dua pada sisi *upstream straight channel* berupa grafik *velocity profile* pada bidang vertikal. *Velocity profile* dalam bentuk bilangan tak berdimensi yang bernilai dari nol sampai satu pada absis sedangkan besarnya profil kecepatan ditunjukkan oleh perbandingan  $\frac{u}{U_{ref}}$  pada ordinat. Absis pada grafik menunjukkan posisi titik dimana nilai  $y/D_h = 0$  adalah posisi yang searah dengan sisi *lower upstream straight channel* dan  $x/D_h = 1$  adalah posisi yang searah dengan sisi *upper upstream straight channel*.

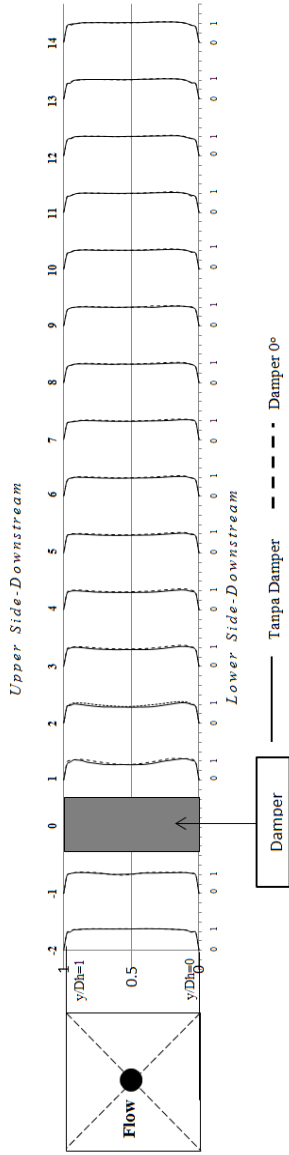
#### 4.2 Perbandingan Profil Kecepatan Bidang Horizontal dan Vertikal Tanpa Damper dengan Sudut Buka *damper* Ganda $0^\circ$ $Re_{Di} = 7,88 \times 10^4$

Secara umum pemasangan *damper* pada instalasi berfungsi untuk mengatur kapasitas dari aliran udara sehingga dapat memenuhi kebutuhan secara maksimal. Namun pemasangan *damper* sebagai bodi pengganggu yang memiliki sudut kemiringan tertentu juga mempengaruhi profil kecepatan aliran setelah melewatinya. Maka dilakukan pengamatan untuk melihat fenomena aliran yang terjadi setelah melewati bodi pengganggu berupa *damper* ganda dengan variasi bukaan sudut  $0^\circ$ . Pada gambar 4.2 dan gambar 4.3 memperlihatkan aliran dua dimensi sepanjang *downstream straight channel* berupa grafik *velocity profile* pada bidang horizontal dan *velocity profile* pada bidang vertikal dengan tanpa *damper* dan sudut bukaan *damper* ganda  $0^\circ$ . Profil kecepatan ditunjukkan dalam bentuk kecepatan tak berdimensi ( $u/U_{ref}$ ) dimana  $u$  adalah kecepatan lokal pada titik *section* tersebut dan  $U_{ref}$  merupakan kecepatan masuk pada *upstream straight channel*.

Pada gambar 4.2 merupakan bentuk profil kecepatan di sepanjang *downstream straight channel* pada bidang horizontal dengan variasi bukaan *damper* ganda  $0^\circ$ . Terdapat dua grafik profil kecepatan yang ditampilkan, dimana untuk garis putus – putus merupakan profil kecepatan aliran yang melewati *ducting* dengan variasi bukaan sudut  $0^\circ$  sedangkan untuk pembandingnya adalah profil kecepatan aliran tanpa *damper* yang ditunjukkan dengan garis.



Gambar 4.2 Distribusi profil kecepatan bidang horizontal pada *downstream straight channel* tanpa damper dan sudut damper ganda 0°



Gambar 4.3 Distribusi profil kecepatan bidang vertikal pada *downstream straight channel* tanpa damper dan sudut damper ganda 0°

*Damper* ganda dengan bukaan sudut  $0^\circ$  yang diletakkan pada posisi  $2D_h$  memiliki profil kecepatan aliran yang hampir sama dengan profil kecepatan aliran tanpa dipasang *damper*. Tidak ada perbedaan yang cukup signifikan antara kedua profil kecepatan pada bidang horizontal dimana aliran setelah meninggalkan *elbow*, kecepatan sisi *outer* lebih besar daripada sisi *inner* atau dapat ditunjukkan pada section -2 pada gambar diatas. Hal ini dipengaruhi adanya perbedaan tekanan antara sisi *inner* dan *outer*, pada sisi *inner* terjadi *backflow* karena adanya daerah separasi pada daerah *inner wall* dimana aliran tidak bisa mengikuti kelengkungan dari sisi *inner elbow* tersebut dan juga memicu terjadinya *secondary flow*. *Backflow* pada grafik dengan garis berwarna merah mempunyai nilai negatif dimana nilai tersebut merupakan nilai estimasi dari *backflow* yang terjadi pada sisi *inner elbow* dengan variasi bukaan *damper* ganda  $0^\circ$ . Pada daerah sebelum melewati *damper* terjadi kerugian yang disebabkan oleh terbentuknya aliran sekunder di sisi *inner elbow* sehingga terdapat *blockage effect* seperti pada gambar 4.2 section -1, akibatnya sebagian besar aliran akan mengalir pada sisi *outer* sehingga memiliki kecepatan yang lebih besar. Sampai pada jarak  $6D_h$  setelah melalui *damper* terjadi *recovery* di sisi *centerline* dimana bentuk profil aliran dengan variasi bukaan *damper* ganda  $0^\circ$  hampir sama dengan profil kecepatan aliran tanpa *damper*.

Pada gambar 4.2 section 8,9 dan 10 terjadi sedikit perbedaan antara kedua grafik tersebut namun tidak terlalu signifikan hal ini dapat disebabkan karena kecepatan aliran sisi *outer* pada instalasi tanpa *damper* memiliki kecepatan yang lebih besar daripada kecepatan aliran sisi *outer* yang dipasang *damper* ganda yang bertujuan sebagai bodi penghalang. Karena tidak ada *damper* yang dipasang, kecepatan sisi *outer* akan menjadi lebih besar. Selanjutnya pada jarak  $x/D_h = 13$  sampai 16 kedua aliran tersebut sudah normal kembali seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.2 section 13 dan 14.

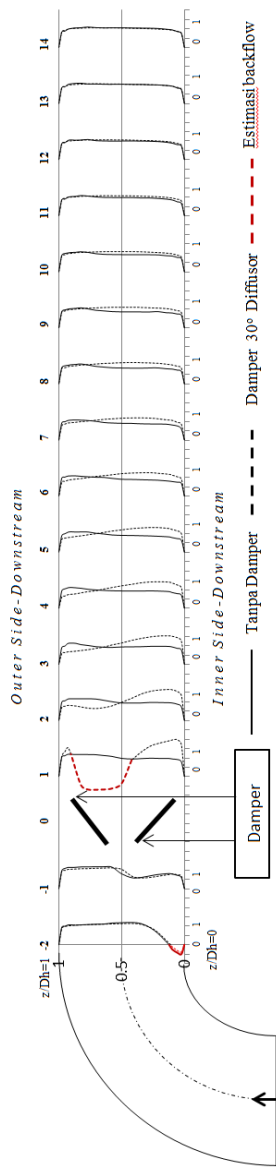
Perbandingan profil kecepatan pada bidang vertikal sepanjang *downstream straight channel* pada saluran tanpa

*damper* dan sudut bukaan *damper* ganda  $0^\circ$  ditunjukkan pada gambar 4.3. Keduanya mempunyai bentuk profil kecepatan hampir sama artinya tidak ada pengaruh dengan adanya sudut bukaan *damper* ganda  $0^\circ$  dan tidak terjadi perubahan profil kecepatan yang signifikan. Dapat dilihat pada *section* -2 kecepatan pada sisi *upper* dan sisi *lower* hampir sama baik profil kecepatan untuk tanpa *damper* dan bukaan *damper* ganda  $0^\circ$  seperti pada gambar 4.3 *section* -2. Terjadi sedikit perubahan untuk kedua profil kecepatan yang ditunjukkan pada gambar 4.3 *section* -1 dimana profil kecepatan pada daerah *centerline* mengalami sedikit perubahan yang disebabkan karena adanya gangguan *damper* ganda sampai jarak  $8D_h$  seperti pada gambar 4.3 *section* 1; 2; 3; 4; 5; 6. Perubahan profil kecepatan ini terjadi hingga  $9D_h$  atau pada *section* 7 setelah melalui *damper* ganda terjadi *recovery* di sisi *centerline* dengan adanya perubahan profil kecepatan pada daerah *centerline* seperti pada gambar 4.3 *section* 7; 8; 9. Selanjutnya pada jarak  $x/D_h = 13$  sampai 16 kedua aliran tersebut sudah mendekati profil kecepatan normal kembali seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.3 *section* 11 sampai 14.

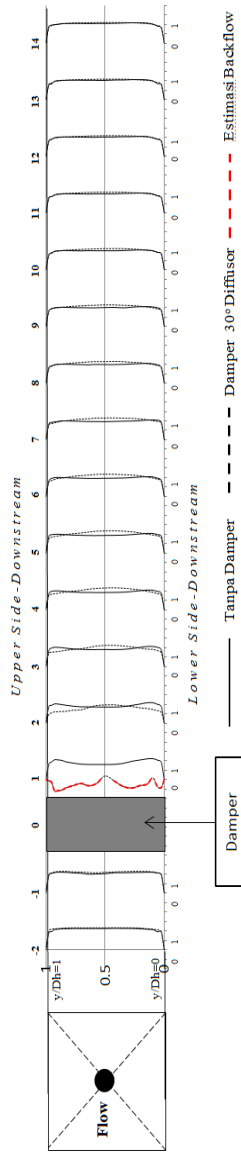
#### **4.3 Perbandingan Profil Kecepatan Bidang Horizontal dan Vertikal Tanpa Damper dengan Sudut Bukaan Damper ganda $30^\circ$ membentuk Diffusor $Re_{Dh} = 7,88 \times 10^4$**

Profil kecepatan yang akan dibahas selanjutnya adalah profil kecepatan pada variasi bukaan *damper* ganda dengan sudut  $30^\circ$  yang membentuk *diffusor*. Gambar 4.4 memperlihatkan perbandingan bentuk profil kecepatan di sepanjang *downstream straight channel* pada bidang horizontal dengan tanpa *damper* dan sudut bukaan *damper* ganda  $30^\circ$  yang membentuk *diffusor*. Informasi yang diperoleh pada gambar diatas dengan variasi bukaan *damper*  $30^\circ$  *diffusor* dan tanpa *damper* saat aliran meninggalkan *outlet elbow*  $90^\circ$  pada *section* -2, kecepatan pada sisi *outer* lebih besar dari pada sisi *inner* untuk kedua profil kecepatan.





Gambar 4.4 Distribusi profil kecepatan bidang horizontal pada *downstream straight channel* tanpa damper dan sudut damper ganda 30° diffusor



Gambar 4.4 Distribusi profil kecepatan bidang vertikal pada *downstream straight channel* tanpa damper dan sudut damper ganda 30° diffusor

Pada sisi *inner* memiliki kecepatan lebih rendah karena terjadi *backflow* yang disebabkan oleh adanya separasi aliran dimana aliran tidak bisa mengikuti bentuk kelengkungan pada daerah *inner wall* seperti pada gambar 4.4 *section* -2. Selain itu adanya perbedaan tekanan antara sisi *inner* dan *outer wall* juga akan berpengaruh pada fenomena aliran yang terjadi setelah keluar dari *elbow* 90°. *Backflow* pada grafik dengan garis berwarna merah mempunyai nilai negatif dimana nilai tersebut merupakan nilai estimasi dari *backflow* yang terjadi pada sisi *inner elbow* dengan variasi bukaan *damper* ganda 0°

Pada daerah *section* -1 terjadi kerugian energi yang disebabkan oleh terbentuknya aliran sekunder di sisi *inner elbow* sehingga terdapat *blockage effect* seperti pada gambar 4.5 *section* -1, akibatnya sebagian besar aliran akan mengalir pada sisi *outer* sehingga memiliki kecepatan yang lebih besar. Namun karena adanya pengaruh dari bukaan *damper* ganda yang membentuk sudut 30° *diffusor*, dapat dilihat pada gambar 4.4 *section* 1 merupakan daerah setelah melewati *damper* ganda pada jarak  $3D_h$  setelah *outlet elbow* dan terjadi perubahan yang signifikan pada variasi bukaan *damper* ganda yang membentuk *diffusor*. Pada bukaan ini (*diffusor*) terjadi *backflow* karena aliran terhambat oleh *damper* tersebut dan aliran mengalir pada sisi – sisi yang tidak tertutup *damper*. Akibatnya aliran tidak bisa mengikuti bentuk kontur bodi *damper* yang membentuk *diffusor* dan mengakibatkan separasi aliran. Sehingga terjadi *wake* setelah *damper* dan menyebabkan *backflow*. Selain itu *backflow* terjadi karena kecepatan yang menurun akibat perbedaan penampang. Aliran yang melewati bentuk *diffusor* menyebabkan penurunan kecepatan dan terjadi *adverse pressure gradient* yang diakibatkan separasi aliran . Seperti yang dapat dilihat pada gambar 4.9(c) bahwa bukaan *damper* yang membentuk *diffusor* memiliki *backflow* yang besar. *Backflow* pada grafik dengan garis berwarna merah mempunyai nilai negatif dimana nilai tersebut merupakan nilai estimasi dari *backflow* yang terjadi pada sisi *inner elbow*

Terjadi perubahan profil aliran kecepatan pada *section 1* dimana pada *section* sebelumnya kecepatan pada sisi *outer* memiliki kecepatan yang lebih besar apabila dibandingkan dengan kecepatan sisi *inner*. Namun pada *section 1* (jarak  $3 D_h$ ) kecepatan berubah dimana kecepatan sisi *inner* lebih besar daripada sisi *outer*. Hal ini disebabkan oleh kecenderungan dari aliran yang bergerak menuju *inner* setelah keluar *damper*. Sisi *outer* yang mempunyai kecepatan yang tinggi akan dihambat atau diganggu oleh adanya *damper* yang membentuk *diffusor*, dimana kecepatan sisi *outer* akan terbagi menjadi 2 setelah menabrak ujung *damper* bagian *outer*. Sebagian aliran akan melewati celah pada sisi *outer* dan sebagian akan melewati *damper*. Selanjutnya aliran akan cenderung mengikuti bentuk kelengkungan bodi dari *damper* bagian *inner* dan akan bertemu dengan aliran yang melewati celah pada sisi *inner*. Terjadinya penggabungan aliran ini mengakibatkan sisi *inner* memiliki kecepatan yang lebih besar daripada kecepatan di sisi *outer* karena pada sisi *outer* kecepatan diperoleh dari aliran yang hanya melewati celah sisi *outer*.

Hal ini sangat berbeda dengan profil kecepatan yang dimiliki oleh saluran tanpa *damper* yang hanya terjadi perubahan kecepatan sisi *outer* lebih besar daripada sisi *inner* yang disebabkan karena adanya aliran sekunder setelah melewati *outlet elbow 90°* tanpa terjadi *backflow* seperti pada gambar 4.4 *section 1*. Dapat dilihat perbedaan antara tanpa *damper* dan bukaan *damper* ganda dengan sudut  $30^\circ$  *diffusor* yang memiliki perbedaan profil kecepatan yang sangat signifikan berbeda dimana untuk tanpa *damper* memiliki kecepatan sisi *outer* yang lebih besar dari sisi *inner* nya sedangkan untuk sudut bukaan *damper 30° diffusor* memiliki profil kecepatan sisi *inner* yang lebih besar dari sisi *outer* hingga jarak  $10D_h$  setelah *outlet elbow 90°* pada *section 8*

Pada jarak  $11D_h$  dari *outlet elbow 90°*, pada profil kecepatan *damper* ganda sudut bukaan  $30^\circ$  *diffusor* kecepatan *inner* perlahan mengalami perubahan semakin kecil dan kecepatan *outer* perlahan mengalami perubahan semakin besar

mendekati *recovery* profil kecepatan yang dapat dilihat perubahannya pada gambar 4.4 *section 2* hingga *section 8* . Sedangkan untuk profil kecepatan tanpa *damper* pada posisi  $11D_h$  , sisi *outer* masih memiliki kecepatan yang lebih besar daripada sisi *inner*. Kemudian pada *section 11* dan *12* bentuk profil kecepatan hampir sama antara tanpa *damper* dengan *damper* ganda sudut bukaan  $30^\circ$  *diffusor* seperti pada gambar 4.4. *section 11* dan *12*. Selanjutnya pada jarak  $x/D_h = 15$  dan  $16$  dari *outlet elbow 90^\circ* kedua aliran tersebut sudah hampir mengalami *recovery* profil kecepatan kembali seperti yang ditunjukkan gambar 4.4 *section 13* dan *14*.

Perbandingan bentuk profil kecepatan di sepanjang *downstream straight channel* pada bidang vertikal ditunjukkan pada gambar 4.5 antara tanpa *damper* dan sudut bukaan *damper* ganda  $30^\circ$  *diffusor* . Dari gambar 4.5 diatas didapat informasi bahwa profil kecepatan sudah mengalami perkembangan sejauh  $12D_h$  dari sisi *outlet elbow 90^\circ*, dimana penempatan *damper* ganda dengan variasi bukaan sangat berpengaruh pada fenomena aliran yang terjadi. Terlihat perbedaan fenomena aliran antara kedua profil kecepatan tersebut tepat setelah aliran melewati bodi penghalang pada *section 1*.

Pada *section -2* dan *-1* mempunyai profil kecepatan yang sama antara tanpa *damper* dengan sudut bukaan *damper* ganda  $30^\circ$  *diffusor* baik kecepatan pada *upper side*, *lower side* maupun pada *centerline* nya seperti terlihat pada gambar 4.5 *section -2*; *-1*. Selanjutnya untuk daerah *section 1* pada tanpa *damper* terjadi perubahan profil kecepatan yaitu terjadi *blockage effect* pada daerah *centerline* akibat adanya aliran sekunder setelah melalui *outlet elbow 90^\circ*. Sedangkan pada *damper* ganda sudut bukaan  $30^\circ$  *diffusor* terjadi perubahan profil kecepatan yang disebabkan karena adanya *damper* sebagai bodi pengganggu yaitu terjadi *backflow* pada profil kecepatan seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.5 *section 1* dengan notasi garis putus – putus.

Pada *section 2* *damper* ganda bukaan  $30^\circ$  *diffusor* aliran mengalami *recovery* profil kecepatan yang ditandai dengan sudah

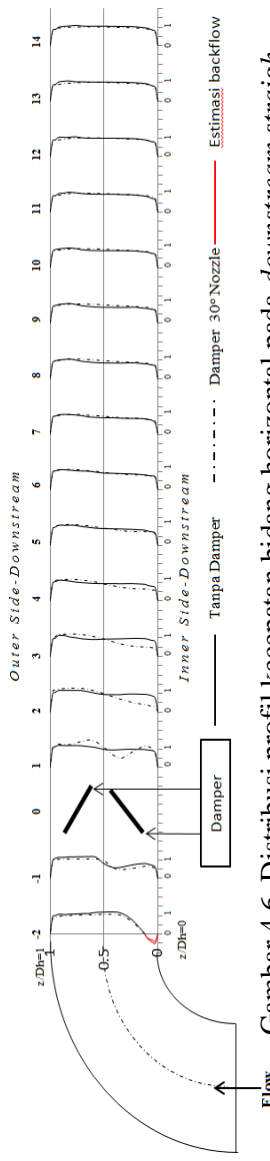
tidak terjadi *backflow*. Pada sisi *upper* dan sisi *lower* tanpa *damper* memiliki kecepatan lebih besar dibandingkan pada sisi *upper* dan sisi *lower damper* ganda sudut bukaan  $30^\circ$  *diffusor*. Tetapi pada daerah *centerline damper* ganda sudut bukaan  $30^\circ$  *diffusor* memiliki kecepatan yang lebih besar dibandingkan dengan tanpa *damper* seperti pada gambar 4.5 *section 2* hingga pada *section 7*. Pada jarak  $10D_h$  sisi *upper* dan sisi *lower* sudah memiliki kecepatan yang sama antara tanpa *damper* dengan *damper* ganda bukaan sudut  $30^\circ$  *diffusor*. Untuk keadaan *centerline* sendiri *damper* ganda bukaan  $30^\circ$  masih memiliki kecepatan yang lebih besar dibandingkan dengan tanpa *damper* pada jarak  $10D_h$

Profil kecepatan dari kedua aliran terus mengalami perkembangan dan mendekati *recovery* hingga pada jarak  $x/D_h = 13$  dan  $14$  profil kecepatan relatif sama antara tanpa *damper* dengan *damper* ganda sudut bukaan  $30^\circ$  *diffusor* seperti gambar 4.5 *section 11* dan *section 12*. Selanjutnya pada jarak  $x/D_h = 15$  dan  $16$  dari *outlet elbow*  $90^\circ$  kedua aliran tersebut sudah mengalami *recovery* profil kecepatan kembali seperti yang ditunjukkan gambar 4.5 *section 13* dan *14*. Pada *damper* ganda dengan bukaan sudut  $30^\circ$  *diffusor* ini profil kecepatan pada bidang vertikal maupun horizontal terjadi *backflow* setelah aliran menabrak *damper* yang dapat dilihat pada gambar 4.4 dan 4.5 *section 1*. Kemudian aliran akan terus berkembang hingga mendekati *recovery* profil kecepatan dimana pada *section 10* dengan jarak  $12D_h$  dari *outlet elbow*  $90^\circ$ , dapat dilihat profil kecepatan aliran sudah kembali dalam keadaan normal baik bidang horizontal dan vertikal

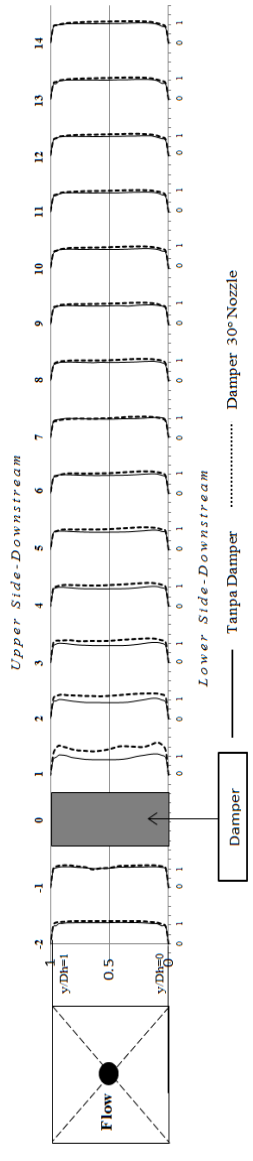
#### 4.4 Perbandingan Profil Kecepatan Bidang Horizontal dan Vertikal Tanpa *Damper* dengan Sudut Buka *Damper* Ganda 30° membentuk *Nozzle* $Re_{Dh} = 7,88 \times 10^4$

Bentuk dari bukaan *damper* ganda mempunyai pengaruh yang besar pada fenomena aliran yang terjadi pada *ducting* selain besarnya bukaan sudut yang digunakan. Selanjutnya akan dibahas profil kecepatan dengan sudut bukaan *damper* ganda 30° yang membentuk *nozzle*. Gambar 4.6 memperlihatkan perbandingan bentuk profil kecepatan di sepanjang *downstream straight channel* pada bidang horizontal dengan tanpa *damper* dan sudut bukaan *damper* ganda 30° yang membentuk *nozzle*. Informasi yang diperoleh pada gambar diatas dengan variasi bukaan *damper* ganda 30° *nozzle* dan tanpa *damper* pada saat aliran meninggalkan *outlet elbow 90°* pada *section -2* kecepatan pada sisi *outer* lebih besar dari pada sisi *inner* untuk kedua profil kecepatan. Hal ini dipengaruhi oleh adanya perbedaan tekanan antara sisi *inner* dan *outer*, dimana pada sisi *inner* terjadi *backflow* karena adanya daerah separasi pada daerah *inner wall* seperti pada gambar 4.6 *section -2*.

*Backflow* pada sisi *inner elbow* terjadi akibat adanya separasi aliran yaitu aliran tidak dapat mengikuti bentuk kelengkungan dari sisi *inner elbow*. Akibatnya terjadi separasi aliran dimana memicu terjadinya *secondary flow* pada aliran setelah keluar dari *elbow*. *Backflow* pada grafik dengan garis berwarna merah mempunyai nilai negatif dimana nilai tersebut merupakan nilai estimasi dari *backflow* yang terjadi pada sisi *inner elbow*. Pada daerah tanpa *damper section -1* terjadi *losses* yang disebabkan oleh terbentuknya aliran sekunder di sisi *inner elbow* sehingga terdapat *blockage effect* seperti pada gambar 4.6 *section -1*, akibatnya sebagian besar aliran akan mengalir pada sisi *outer* sehingga memiliki kecepatan yang lebih besar. Sedangkan pada daerah *section -1* dengan sudut bukaan *damper* ganda 30° *nozzle* terjadi *blockage effect* yang lebih kecil jika dibandingkan dengan tanpa *damper*.



Gambar 4.6 Distribusi profil kecepatan bidang horizontal pada *downstream straight channel* tanpa *damper* dan sudut *damper* ganda 30° *nozzle*



Gambar 4.7 Distribusi profil kecepatan bidang vertikal pada *downstream straight channel* tanpa *damper* dan sudut *damper* ganda 30° *nozzle*

Selanjutnya pada jarak  $3D_h$  pada section 1 profil kecepatan tanpa *damper* sudah tidak terjadi *blockage effect* pada sisi *inner* dimana aliran pada sisi *inner* sudah berkembang namun memiliki kecepatan yang lebih kecil dari sisi *outer* karena pengaruh *blockage effect* pada section -1. Untuk profil kecepatan pada variasi bukaan sudut *damper* ganda  $30^\circ$  *nozzle* pada section 1 memiliki profil kecepatan yang acak dimana sisi *inner* memiliki kecepatan yang lebih besar daripada sisi *outer*. Hal ini terjadi akibat pengaruh dari aliran yang menabrak bodi penghalang atau *damper* ganda yang dibuka dengan sudut  $30^\circ$  membentuk *nozzle*. Dapat dijelaskan bahwa pada saat sebagian aliran pada sisi *inner* pada section -1 (sebelum *damper*) akan mengalir pada sisi *outer* namun terhalang oleh adanya *damper*. Aliran yang terbentur ujung *damper* ini akhirnya terpecah dan terbagi menjadi dua yaitu sebagian aliran melewati sisi tengah *damper* ganda yang membentuk *nozzle* dan sebagian lainnya melewati tepi *damper* yang membentuk *diffusor*. Akibatnya, kecepatan pada sisi *inner* memiliki kecepatan yang sedikit lebih besar daripada sisi *outer* karena pengaruh dari aliran yang menabrak ujung *damper*. Sebagian aliran yang berhasil melewati sisi dalam *damper* memiliki kecepatan yang tinggi karena pengaruh bukaan *damper* yang membentuk *nozzle* dan dapat dilihat pada gambar 4.6 section 1 kecepatan paling besar terjadi sedikit di atas *centerline*. Untuk kecepatan pada sisi *outer* pada section 1 memiliki kecepatan yang lebih besar dengan kecepatan sisi *outer* pada section -1 dan terjadi *backflow* di bawah *centerline* akibat daerah *wake* yang terjadi setelah adanya *damper* ganda.

Selanjutnya pada gambar 4.6 section 2 profil kecepatan pada variasi bukaan *damper* ganda  $30^\circ$  *nozzle* terjadi perubahan kecepatan pada sisi *outer* yang sudah memiliki kecepatan lebih besar daripada kecepatan sisi *inner*. Sedangkan untuk profil kecepatan tanpa *damper* pada section 2 terlihat bahwa tidak ada perubahan yang signifikan apabila dibandingkan dengan section 1. Dapat dilihat perbandingan profil kecepatan pada section 2 dimana pada sisi *outer* profil kecepatan bukaan *damper* ganda



sudut  $30^\circ$  *nozzle* lebih besar dari pada sisi *outer* profil kecepatan tanpa *damper* dan untuk sisi *inner* profil kecepatan tanpa *damper* memiliki kecepatan yang lebih besar karena aliran tidak terganggu oleh bodi penghalang.

Profil kecepatan terus berkembang hingga pada jarak  $13D_h$  terjadi *recovery* kecepatan antara sisi *inner* dan sisi *outer* sudah memiliki kecepatan yang relatif sama untuk kedua profil kecepatan.. Hal ini terjadi sampai *section* 12 (jarak  $14D_h$ ) terlihat seperti pada gambar 4.6 *section* 12 pada sisi *inner* dan *outer* sudah memiliki kecepatan yang hampir sama baik pada profil kecepatan tanpa *damper* dan bukaan *damper* ganda dengan sudut  $30^\circ$  *nozzle* . Selanjutnya pada jarak  $x/D_h = 15$  sampai 16 dari *outlet elbow*  $90^\circ$  kedua aliran tersebut sudah hampir mengalami *recovery* profil kecepatan normal kembali seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.6 *section* 13 dan 14.

Gambar 4.7 merupakan profil kecepatan di sepanjang *downstream straight channel* pada bidang vertikal antara tanpa *damper* yang ditandai dengan garis lurus tanpa putus dan variasi bukaan *damper* ganda dengan sudut  $30^\circ$  *nozzle* yang ditandai dengan garis putus – putus. Pada *section* -2 dan -1 setelah aliran meninggalkan *outlet elbow*  $90^\circ$  terlihat profil kecepatan aliran yang hampir sama antara tanpa *damper* dengan bukaan *damper* ganda dengan sudut  $30^\circ$  *nozzle* seperti pada gambar 4.7 *section* -2; -1. Belum ada perubahan kecepatan pada sisi *upper* dan sisi *lower* pada kedua aliran tersebut.

Setelah aliran melewati *damper* yang berbentuk *nozzle* dengan sudut  $30^\circ$  terjadi perubahan profil kecepatan seperti yang terlihat pada gambar 4.7 *section* 1 . Untuk profil kecepatan tanpa *damper* pada *section* 1 ini terjadi *blockage effect* pada daerah *centerline* akibat adanya aliran sekunder setelah melalui *outlet elbow*  $90^\circ$ . Selain itu sisi *upper* pada profil kecepatan tanpa *damper* memiliki kecepatan yang lebih kecil jika dibandingkan dengan kecepatan sisi *lowernya*. Profil kecepatan yang terjadi pada *section* 1 ini *damper* ganda dengan sudut bukaan  $30^\circ$  *nozzle* memiliki kecepatan yang lebih besar apabila dibandingkan

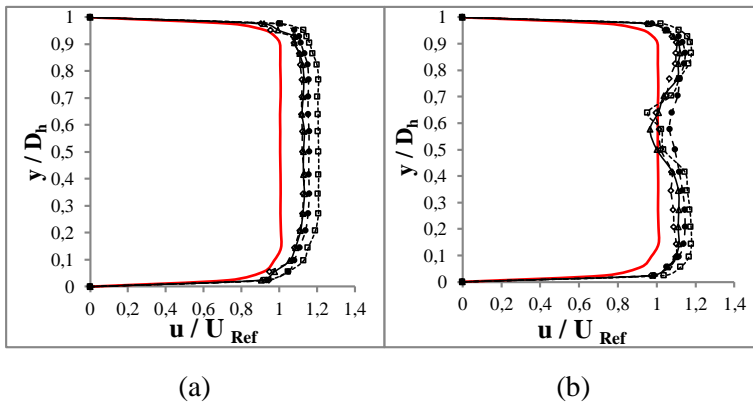
dengan tanpa *damper* baik pada sisi *upper*, sisi *lower* dan *centerline*. Hal ini membuktikan bahwa penempatan *damper* ganda yang membentuk sudut *nozzle*  $30^\circ$  berpengaruh pada meningkatnya kecepatan aliran setelah melewati *damper*. Untuk profil kecepatan dengan bukaan *damper* ganda dengan sudut  $30^\circ$  *nozzle* pada *section* 1 terlihat sedikit acak dengan sisi *lower* memiliki kecepatan sedikit lebih besar daripada kecepatan pada sisi *upper*. Selain itu di daerah *centerline* juga terjadi *blockage effect* akibat adanya aliran sekunder setelah melalui *outlet elbow*  $90^\circ$  sama seperti *centerline* pada profil kecepatan tanpa *damper*.

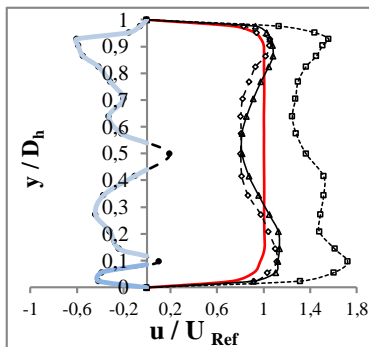
Pada *section* 2 dengan bukaan *damper* ganda dengan sudut  $30^\circ$  *nozzle* terjadi *recovery* profil kecepatan yang semula acak pada *section* 1 sudah lebih mendekati profil kecepatan normal dengan kecepatan pada sisi *upper* hampir sama dengan kecepatan pada sisi *lower*. Hal serupa juga ditunjukkan pada profil kecepatan tanpa *damper* dimana *blockage effect* yang terjadi pada *centerline* perlahan mulai berkurang dan profil kecepatan pada *centerline* terus mendekati kecepatan normal. Begitu juga dengan kecepatan sisi *lower* dan *upper* perlahan mengalami perubahan dan mendekati kecepatan normal. Hingga pada jarak  $9D_h$  terjadi *recovery* kecepatan pada kedua aliran dimana pada *section* 7 ini profil kecepatan relatif sama antara tanpa *damper* dengan *damper* ganda dengan sudut bukaan  $30^\circ$  *nozzle* seperti gambar 4.7 *section* 7. Profil kecepatan terus mengalami perkembangan mendekati kecepatan normal dan tidak ada perubahan profil kecepatan yang signifikan dari kedua aliran ini. Selanjutnya pada jarak  $x/D_h = 14$  dari *outlet elbow*  $90^\circ$  kedua aliran tersebut sudah hampir kembali mengalami *recovery* profil kecepatan seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.7 *section* 12; 13; 14.

#### 4.5. Perbandingan Distribusi Profil Kecepatan Bidang Vertikal dan Bidang Horizontal Tanpa *Damper* dengan Sudut Buka *Damper* Ganda $0^\circ$ , Sudut Buka *Damper* $30^\circ$ *Nozzle* dan $30^\circ$ *Diffusor* $Re_{Dh} = 7,88 \times 10^4$

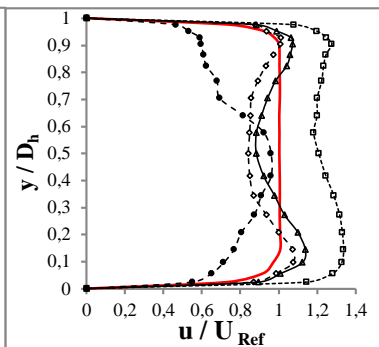
Pada bab ini menjelaskan gambaran umum distribusi *velocity profile* pada bidang horizontal dan vertikal beserta kontur yang mewakili besar kecepatan sepanjang aliran *downstream straight channel* pada bidang vertikal dan horizontal seperti pada gambar 4.8; 4.9.

Dari gambar 4.8 akan dibahas penjelasan analisa tentang bagaimana perilaku aliran secara dua dimensi pada bidang vertikal sepanjang *downstream straight channel* berupa grafik *velocity profile*. Grafik *velocity profile* dalam bentuk bilangan tak berdimensi yang bernilai dari nol sampai satu pada absis sedangkan besarnya profil kecepatan ditunjukkan oleh perbandingan  $\frac{u}{U_{ref}}$  pada ordinat. Absis pada grafik menunjukkan posisi titik dimana nilai  $y/D_h = 0$  adalah posisi yang searah dengan sisi *lower*, sedangkan  $y/D_h = 1$  adalah posisi yang searah dengan sisi *upper*, agar lebih jelas ditunjukkan grafik perbandingan antara tanpa *damper* dengan sudut bukaan *damper* ganda  $0^\circ$  , sudut bukaan *damper* ganda  $30^\circ$  *nozzle* dan  $30^\circ$  *diffusor* seperti pada gambar 4.8

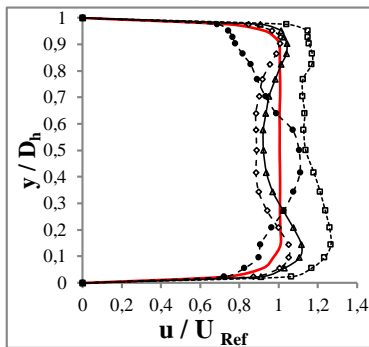




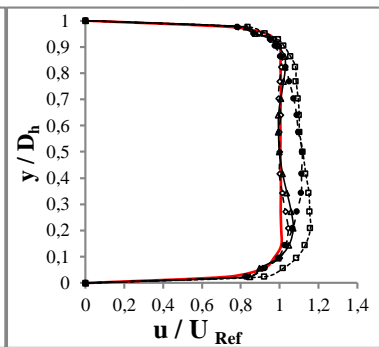
(c)



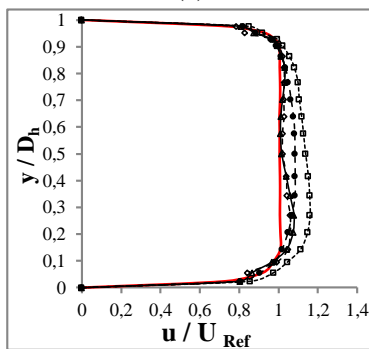
(d)



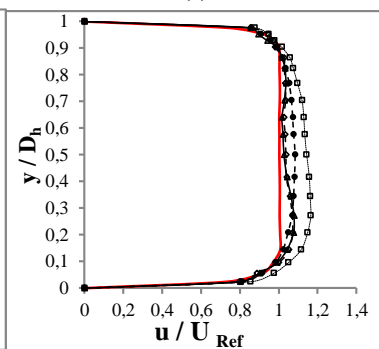
(e)



(f)



(g)



(h)

Keterangan :



**Gambar 4.8** Grafik *velocity profile* bidang vertikal pada masing-masing posisi *cross-section* berdasarkan *test section* : a) -2; b) -1; c) 1; d) 2; e) 3; f) 10 ;g) 13; h) 14

Pada gambar 4.8 secara umum menggambarkan bentuk profil kecepatan pada bidang vertikal di sepanjang *downstream straight channel* yang dijelaskan sebagai berikut : saat meninggalkan *outlet elbow 90°*, kecepatan pada sisi *upper* terlihat memiliki kecepatan yang sedikit lebih besar apabila dibandingkan dengan sisi *lower* seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.8 (a). Hal ini dipengaruhi oleh adanya perbedaan tekanan antara sisi *lower* dan *upper*. Setelah keluar dari *elbow 90°* pada variasi bukaan *damper* bentuk *nozzle 30°* memiliki kecepatan paling tinggi dan selanjutnya diikuti oleh variasi bukaan *damper* bentuk *diffusor 30°*. Untuk variasi tanpa *damper* dan variasi bukaan *damper 0°* memiliki kecepatan yang hampir sama baik pada sisi *upper*, sisi *lower* dan pada daerah *centerline*. Tidak terjadi *backflow* setelah keluar dari *elbow 90°* pada masing – masing variasi bukaan *damper*. Selanjutnya profil kecepatan terlihat mengalami perubahan pada jarak  $2D_h$  setelah keluar dari *elbow 90°*. Pada daerah *centerline* terlihat sedikit mengalami penurunan kecepatan untuk semua variasi bukaan *damper*. Hal ini disebabkan oleh adanya pengaruh *damper* yang terpasang pada *ducting*. *Damper* selaku bodi penghalang memberikan efek pada daerah *centerline* yang akhirnya terjadi penurunan kecepatan seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.8 (b). Sedangkan pada sisi *upper* dan pada sisi *lower* belum tampak terjadi perubahan yang signifikan pada *section -1*.

Pada gambar 4.8 (c) memperlihatkan profil kecepatan pada bidang vertikal setelah aliran melalui *damper*. Terlihat adanya perubahan yang signifikan pada profil kecepatan terutama pada variasi bukaan *damper* sudut  $30^\circ$  *diffusor*. Pada variasi bukaan ini terjadi *backflow* hampir pada semua titik pengambilan profil kecepatan. Hal ini disebabkan oleh bukaan *damper* yang membentuk *diffusor* dimana dengan perbedaan penampang yang dilewati oleh aliran. Kecepatan aliran pada bukaan *damper* semakin menurun karena penampang *inlet* memiliki area yang lebih kecil daripada area *outlet* aliran. Akibatnya terjadi separasi dimana aliran tidak bisa mengikuti kontur bodi *damper* dan terjadilah tekanan balik atau *adverse pressure gradient*. Penurunan kecepatan aliran dan terjadinya *adverse pressure gradient* mendukung terjadinya *backflow* pada variasi bukaan *damper*  $30^\circ$  *diffusor* di semua titik pengambilan profil kecepatan. *Backflow* pada grafik dengan garis berwarna biru mempunyai nilai negatif dimana nilai tersebut merupakan nilai estimasi dari *backflow* yang terjadi pada daerah setelah melewati *damper* ganda dengan sudut  $30^\circ$  *diffusor*. Pada variasi bukaan *damper* sudut  $30^\circ$  *nozzle* tidak terjadi *backflow*. Karena memiliki bentuk *nozzle* yang memiliki area *inlet* lebih besar daripada area *outlet*, maka aliran yang melewati *damper* memiliki kenaikan kecepatan. Seharusnya kenaikan kecepatan terlihat pada daerah *centerline* karena *outlet* aliran yang memiliki area lebih kecil berada pada daerah *centerline*. Namun pada hasil yang diperoleh sisi *upper* dan sisi *lower* memiliki kecepatan yang lebih tinggi di daripada daerah *centerline*. Hal ini disebabkan karena aliran sebelum melewati *damper* sudah memiliki kecepatan yang menurun pada sisi *centerline*. Setelah melewati *damper* memang daerah *centerline* mengalami kenaikan kecepatan, namun pada sisi *upper* dan sisi *lower* karena tidak terhalang oleh *damper* memiliki kecepatan yang lebih besar. Untuk variasi bukaan *damper*  $0^\circ$  dan tanpa *damper* mengalami perubahan pada *centerline* dibandingkan dengan *section* sebelumnya. Kecepatan pada daerah *centerline* masih mengalami penurunan kecepatan dan kecepatan

paling rendah pada *centerline* terdapat pada *ducting* tanpa *damper*.

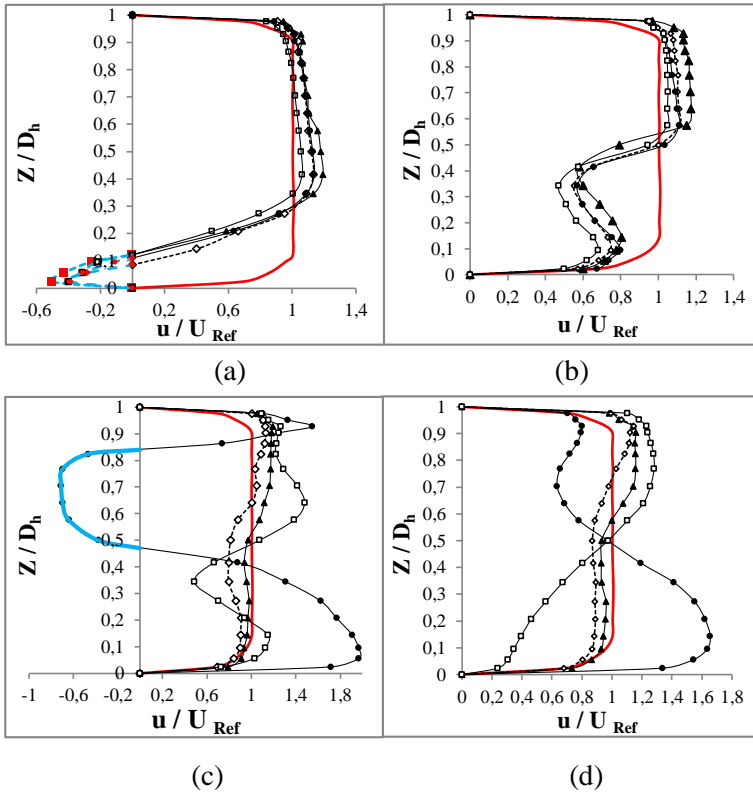
Gambar 4.8 (d) merupakan *section 2* atau terletak pada jarak  $4D_h$  setelah *outlet elbow*  $90^\circ$ , profil kecepatan mengalami perubahan terutama pada variasi bukaan *damper*  $30^\circ$  *diffusor*. Pada variasi ini sudah tidak terjadi *backflow* dan profil kecepatan pada daerah *centerline* memiliki kecepatan yang tinggi. Sisi *lower* memiliki kecepatan yang lebih tinggi daripada kecepatan pada sisi *upper*. Untuk variasi bukaan *damper*  $30^\circ$  *nozzle* tidak ada perubahan yang signifikan hanya saja profil kecepatan pada *section* ini sedikit lebih *smooth* daripada *section* sebelumnya. Pada sisi *lower* masih memiliki kecepatan yang lebih besar daripada sisi *upper*. Untuk variasi *damper*  $0^\circ$  dan tanpa *damper* adalah sama pada *section* sebelumnya dimana masih terjadi penurunan kecepatan di daerah *centerline*. Pada jarak  $5D_h$  setelah *outlet elbow*  $90^\circ$  namun relative sama pada *section* sebelumnya yaitu *section 2*. Pada variasi bukaan *damper*  $30^\circ$  *diffusor* di daerah *centerline* masih terjadi kenaikan kecepatan dan kecepatan pada sisi *upper* dan sisi *lower* hampir memiliki kecepatan yang sama. Pada variasi bukaan *damper*  $30^\circ$  *nozzle* terlihat kecepatan menurun seperti yang terlihat pada gambar 4.8 (e). Untuk variasi bukaan *damper*  $0^\circ$  dan tanpa *damper* tidak ada perubahan yang signifikan dibandingkan dengan *section* sebelumnya. Selanjutnya gambar 4.8 (f) merupakan profil kecepatan pada jarak  $12D_h$  setelah *outlet elbow* atau pada *section 10*. Pada jarak ini sebagian profil kecepatan sudah mengalami *recovery* profil kecepatan yang dibandingkan dengan kecepatan *inlet upstream*. Terlihat pada variasi bukaan  $30^\circ$  *diffusor*, variasi bukaan *damper*  $0^\circ$  dan tanpa *damper* pada sisi *lower* dan sisi *upper* memiliki kecepatan yang hampir mengalami *recovery*. Selain itu pada variasi bukaan *damper*  $0^\circ$  dan tanpa *damper* pada daerah *centerline* mengalami kenaikan kecepatan dan sudah memiliki kecepatan normal. Pada variasi bukaan *damper*  $30^\circ$  *nozzle* masih memiliki kecepatan yang tinggi dibandingkan dengan variasi bukaan *damper* lainnya.

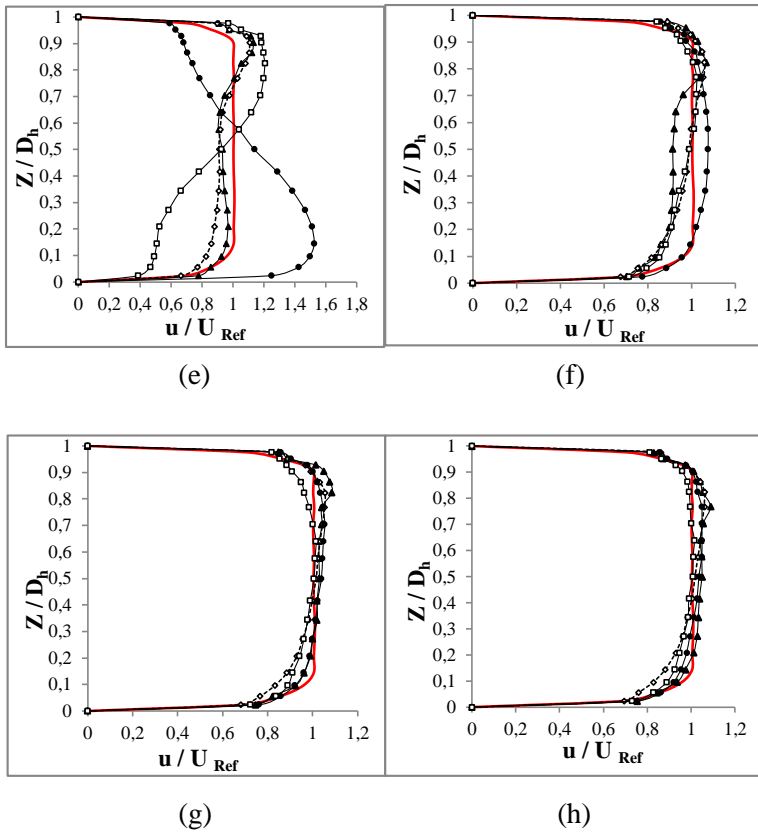
Selanjutnya pada jarak  $x/D_h = 15$  *outlet elbow*  $90^\circ$  pada sisi *upper* dan sisi *lower* memiliki profil kecepatan yang semakin sedikit selisihnya dan hampir terlihat berhimpit yaitu antara variasi bukaan *damper*  $30^\circ$  *diffusor*, variasi bukaan *damper*  $30^\circ$  *nozzle*, variasi bukaan *damper*  $0^\circ$  dan variasi tanpa *damper*. Pada sisi *lower* dan sisi *upper* masing – masing bukaan telah mengalami *recovery* profil kecepatan apabila dibandingkan dengan kecepatan *inlet upstream*. Pada variasi bukaan *damper*  $30^\circ$  *nozzle* memiliki kecepatan paling tinggi pada daerah *centerline* diikuti dengan variasi bukaan *damper*  $30^\circ$  *diffusor*. Untuk variasi bukaan *damper*  $0^\circ$  dan tanpa *damper* pada daerah *centerline* telah mengalami *recovery* profil kecepatan. Aliran terus mengalami perkembangan hingga jarak  $16D_h$  dari *outlet elbow*  $90^\circ$  seperti pada gambar 4.8(h). Pada *section* ini pada variasi bukaan *damper nozzle*  $30^\circ$  masih memiliki kecepatan *upper*, kecepatan *lower* dan daerah *centerline* yang paling besar. Tidak ada perbedaan yang signifikan apabila dibandingkan dengan jarak  $15D_h$  dimana pada sisi *upper* dan sisi *lower* untuk semua variasi bukaan *damper* telah mencapai *recovery* profil kecepatan apabila dibandingkan dengan profil kecepatan *inlet upstream*. Untuk variasi bukaan *damper* sudut  $0^\circ$  dan tanpa *damper* pada daerah *centerline* telah memiliki kecepatan yang normal namun untuk variasi bukaan *damper*  $30^\circ$  *nozzle* dan variasi bukaan *damper*  $30^\circ$  *diffusor* memiliki kecepatan yang tinggi pada daerah *centerline*. Sehingga dapat dikatakan untuk kedua bukaan ini belum mencapai *recovery* profil kecepatan tepatnya di daerah *centerline*.

Pada gambar 4.9 akan dibahas penjelasan analisa tentang profil kecepatan bidang horizontal pada masing – masing cross section sepanjang *downstream straight channel* berupa grafik *velocity profile*. *Velocity profile* dalam bentuk bilangan tak berdimensi yang bernilai dari nol sampai satu pada absis sedangkan besarnya profil kecepatan ditunjukkan oleh perbandingan  $\frac{u}{U_{ref}}$  pada ordinat. Absis pada grafik menunjukkan posisi titik dimana nilai  $z/D_h = 0$  adalah posisi yang searah dengan sisi *inner downstream straight channel* dan  $z/D_h = 1$  adalah posisi



yang searah dengan sisi *outer downstream straight channel*. Analisa akan dijelaskan perbandingan antara tanpa damper dengan sudut bukaan *damper* ganda  $0^\circ$ ,  $30^\circ$  *nozzle* dan  $30^\circ$  *diffusor*





Keterangan :

- |   |   |
|---|---|
| <span style="color: red;">—</span> Sisi Upstream                      | <span style="color: black;">—●—</span> Sudut Damper 30 Derajat Diffusor |
| <span style="color: black;">—▲—</span> Tanpa Damper                   | <span style="color: black;">—□—</span> Sudut Damper 30 Derajat Nozzle   |
| <span style="color: black;">- - -◇- - -</span> Sudut Damper 0 Derajat | <span style="color: blue;">- - - - -</span> Estimasi nilai backflow     |

**Gambar 4.9** Grafik *velocity profile* bidang horizontal pada masing-masing posisi *cross-section* berdasarkan *test section* :  
a) -2; b) -1; c) 1; d) 2; e) 3; f) 10 ;g) 13; h) 14

Pada gambar 4.9 secara umum menggambarkan bentuk profil kecepatan pada bidang horizontal di sepanjang *downstream straight channel* yang dijelaskan sebagai berikut : saat meninggalkan *outlet elbow 90°*, kecepatan pada sisi *outer* lebih besar dari pada sisi *inner* seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.9 (a). Hal ini dipengaruhi oleh adanya perbedaan tekanan antara sisi *inner* dan *outer*, pada sisi *inner* terjadi *backflow* karena adanya daerah separasi dan *secondary flow* pada daerah *inner wall*. Saluran tanpa damper mempunyai *backflow* lebih tinggi karena titik separasi terjadi lebih cepat. Sedangkan pada saluran yang menggunakan *damper* dengan bukaan sudut  $30^\circ$  yang membentuk *nozzle* dan *diffusor* dan bukaan sudut *damper* ganda  $0^\circ$  mempunyai *backflow* yang rendah dan ketiganya memiliki titik yang hampir berhimpitan pada daerah *backflow* (sisi *inner* ). *Backflow* pada grafik ditunjukkan dengan garis berwarna biru mempunyai nilai negatif dimana nilai tersebut merupakan nilai estimasi dari *backflow* yang terjadi pada sisi *inner elbow* pada tiap variasi bukaan *damper* ganda . Pada saluran ditempatkan body penghalang (*damper*) yang menyebabkan tertundanya titik separasi. Pada daerah sebelum melewati *damper* terjadi kerugian yang disebabkan oleh terbentuknya aliran sekunder di sisi *inner elbow* sehingga terdapat *blockage effect*, akibatnya sebagian besar aliran akan mengalir pada sisi *outer* sehingga memiliki kecepatan yang lebih besar seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.9(b). Profil kecepatan paling tinggi pada sisi *outer* terjadi pada saluran tanpa *damper* ganda sedangkan profil kecepatan paling rendah pada sisi *outer* terjadi pada variasi *damper* ganda dengan sudut bukaan  $30^\circ$  membentuk *nozzle*. Pada sisi *inner* kecepatan tertinggi terjadi pada saluran tanpa *damper* dan kecepatan terendah terjadi pada variasi *damper* ganda yang membentuk *nozzle* dengan sudut  $30^\circ$

Pada gambar 4.9.(c) merupakan daerah setelah melewati *damper* ganda pada jarak  $3D_h$  setelah *outlet elbow* dan terjadi perubahan yang signifikan pada variasi bukaan *damper* ganda yang membentuk *diffusor*. Setelah aliran melalui *elbow 90°*, akan

terjadi separasi aliran pada sisi *inner wall*. Terjadinya separasi akan menyebabkan backflow pada sisi *inner wall* sehingga kecepatan ke arah sumbu z semakin rendah dan diberikan estimasi nilai *backflow* berupa nilai negative . Pada grafik ditandai dengan warna yang berbeda sebagai nilai estimasi *backflow*. Mengingat aliran di sisi *outer* mempunyai kecepatan yang lebih besar, maka aliran akan menuju ke daerah yang memiliki energi rendah yaitu pada sisi *inner wall*. Hal ini akan mengakibatkan terjadinya aliran sekunder dan mengakibatkan peningkatan energi (momentum) yang besar pada sisi *inner wall* sehingga aliran akan mengalami *reattachment*. Setelah aliran mengalami *reattachment*, kecepatan pada sisi *inner wall* seolah – olah semakin dipercepat saat melewati damper ganda. Selanjutnya baik pada sisi *inner* dan sisi *outer* aliran melewati celah *nozzle* , sedangkan pada *centerline* seolah – olah dilewatkan pada *diffusor*. Sehingga saat aliran keluar dari damper, kecepatan pada sisi *inner* tampak semakin besar sedangkan kecepatan pada sisi *outer* mengalami penambahan yang tidak signifikan. Namun pada bagian *centerline* tampak terjadi *backflow* karena aliran harus melawan *adverse pressure gradient* dalam bentuk *diffusor*. *Backflow* pada grafik dengan garis berwarna biru mempunyai nilai negatif dimana nilai tersebut merupakan nilai estimasi dari *backflow* yang terjadi pada daerah setelah damper dengan variasi bukaan damper ganda 30° *diffusor*. Pada bukaan *nozzle* 30° tidak terjadi *backflow* karena aliran yang melewati penampang semakin kecil maka kecepatannya semakin naik. Terlihat kecepatan yang tidak sama pada bukaan *nozzle* 30° karena sebagian aliran juga terhambat dengan adanya damper.

Pada gambar 4.9(d) memperlihatkan bahwa bukaan damper 30° *diffusor* sudah tidak memiliki *backflow* namun pada sisi *inner* masih memiliki kecepatan yang tinggi namun sudah berkurang dari *section* sebelumnya . Dalam hal ini *recovery* aliran belum terjadi pada profil kecepatan dengan jarak  $4D_h$  setelah *outlet elbow* 90°. Pada bukaan damper ganda sudut 30° yang membentuk *nozzle* memiliki kecepatan *outer* paling tinggi jika

dibandingkan dengan variasi bukaan lainnya. Sementara kecepatan pada sisi *inner* memiliki kecepatan yang semakin rendah karena dipengaruhi oleh bukaan dari sisi *damper* yang membentuk *diffusor*. Untuk bukaan *damper* ganda  $0^\circ$  dan tanpa *damper* profil kecepatan menunjukkan bahwa sisi *outer* memiliki kecepatan yang lebih tinggi daripada sisi *inner* disebabkan pada sisi *inner* masih terdapat pengaruh aliran sekunder sebelumnya. Sampai pada jarak ini masih ada aliran sekunder pada daerah *centerline* sehingga terjadi *blockage effect* pada saluran tanpa *damper* dan semua variasi sudut bukaan *damper*. Pada jarak  $5D_h$  profil kecepatan masing – masing bukaan masih sama dengan sebelumnya dimana pada bukaan *diffusor*  $30^\circ$  memiliki kecepatan yang besar pada sisi *inner* namun tidak sebesar pada *section* sebelumnya dan memiliki kecepatan *inner* paling besar dibanding dengan variasi bukaan lainnya. Sama halnya pada sisi *outer* aliran terus berkembang dengan bertambahnya profil kecepatan. Pada bukaan *damper nozzle*  $30^\circ$  juga memiliki bentuk profil kecepatan yang sama dengan *section* sebelumnya dimana pada sisi *outer* memiliki kecepatan yang lebih besar daripada kecepatan pada sisi *inner* dan pada bukaan ini memiliki kecepatan *outer* paling tinggi dibandingkan dengan variasi bukaan *damper* lainnya seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.9(e).

Profil kecepatan yang ditunjukkan pada gambar 4.9(f) yaitu pada jarak sejauh  $12D_h$  dari *outlet elbow*. Pada gambar didapat informasi bahwa pada sisi *outer* untuk masing – masing bukaan *damper* hampir mengalami *recovery* profil kecepatan apabila dibandingkan dengan profil kecepatan *inlet upstream*. Variasi bukaan *damper* ganda  $0^\circ$  memiliki kecepatan yang paling besar daripada variasi bukaan *damper* lain namun hanya memiliki selisih yang sedikit dan kecepatan sisi *outer* paling rendah terjadi pada variasi bukaan *nozzle*  $30^\circ$ . Pada sisi *inner* dengan variasi bukaan sudut  $30^\circ$  *diffusor* memiliki kecepatan yang semakin menurun dan hampir mengalami *recovery* profil kecepatan. Pada variasi bukaan ini memiliki profil kecepatan paling besar pada daerah *centerline* apabila dibandingkan dengan variasi bukaan

*damper* lainnya. Untuk variasi bukaan  $30^\circ$  *nozzle* , variasi bukaan *damper*  $0^\circ$  dan tanpa *damper* , aliran pada sisi *inner* masih terus berkembang daripada *section* sebelumnya dan variasi bukaan  $30^\circ$  *nozzle* memiliki kecepatan yang paling kecil. Pada *section* 10 dengan jarak  $12D_h$  kecepatan sisi *inner* lebih kecil daripada kecepatan di sisi *outer* untuk semua variasi bukaan sudut *damper* ganda . dengan sudut bukaan *damper*  $30^\circ$  mempunyai nilai kecepatan sisi *outer* yang paling tinggi jika dibandingkan dengan tanpa *damper* dan variasi sudut bukaan *damper* lainnya.

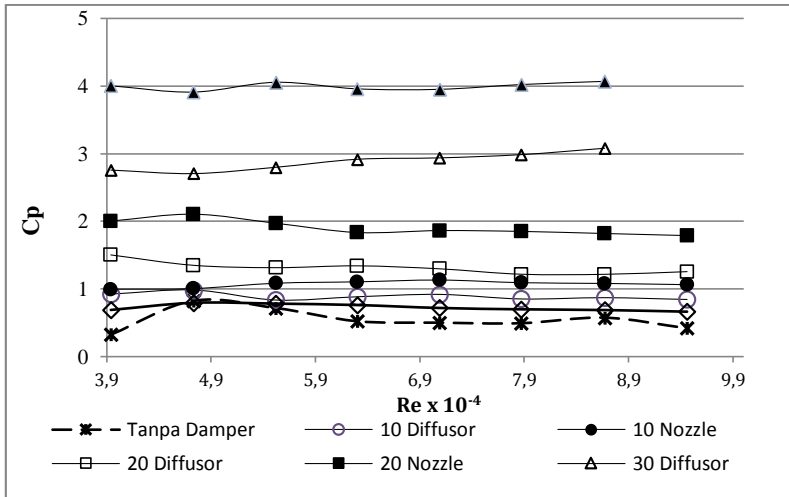
Selanjutnya pada jarak  $x/D_h = 15$  *outlet elbow*  $90^\circ$  pada sisi *inner* memiliki profil kecepatan yang semakin sedikit selisihnya dan hampir terlihat berhimpit yaitu antara variasi bukaan *damper*  $30^\circ$  *diffusor*, variasi bukaan *damper*  $30^\circ$  *nozzle* dan variasi tanpa *damper*. Sedangkan kecepatan paling kecil pada sisi *inner* didapat pada variasi bukaan *damper*  $0^\circ$ . Pada variasi bukaan *damper*  $30^\circ$  *nozzle* memiliki kecepatan paling rendah dan semakin menurun pada sisi *outer* namun hampir mengalami *recovery* aliran pada daerah *centerline*. Pada sisi *outer* untuk variasi bukaan *damper*  $30^\circ$  *diffusor*, variasi bukaan *damper*  $0^\circ$  dan tanpa *damper* juga terlihat berhimpit dan kecepatan *outer* paling tinggi didapat pada variasi tanpa *damper*. Aliran terus mengalami perkembangan hingga jarak  $16D_h$  dari *outlet elbow*  $90^\circ$  seperti pada gambar 4.9(h). Pada *section* ini pada variasi bukaan *damper nozzle*  $30^\circ$  memiliki kecepatan *inner* , kecepatan *outer* dan daerah *centerline* yang hampir *recovery* apabila dibandingkan dengan kecepatan sisi *inlet upstream*. Pada variasi bukaan *damper*  $30^\circ$  *diffusor* dan variasi tanpa *damper* terus berhimpit pada sisi *inner*, sisi *outer* dan daerah *centerline*. Untuk kedua variasi bukaan tersebut masih memiliki kecepatan yang besar pada daerah *centerline* namun pada sisi *inner* dan *outer* sudah memiliki kecepatan yang normal. Pada variasi bukaan *damper* sudut  $0^\circ$  profil kecepatan belum mengalami *recovery* profil kecepatan terutama pada sisi *inner* dan daerah *centerline*. Untuk kecepatan pada sisi *outer*, variasi bukaan *damper*  $0^\circ$  sudah mengalami *recovery* profil kecepatan seperti profil kecepatan bidang horizontal sisi *inlet upstream*

#### 4.6 Pressure Drop

Aliran fluida yang mengalir pada saluran akan mengakibatkan berbagai fenomena aliran diantaranya separasi aliran dan *secondary flow* yang disebabkan oleh aliran yang keluar dari *elbow* 90°. Terjadinya separasi aliran dan *secondary flow* memberikan kontribusi yang besar dalam menimbulkan *pressure drop* aliran. *Pressure drop* adalah istilah yang digunakan untuk menggambarkan penurunan tekanan dari satu titik ke titik lain dalam saluran. Secara tidak langsung *pressure drop* dapat mengurangi head aliran, sehingga daya yang dibutuhkan oleh instalasi seperti pada pompa, kompresor, dan blower akan meningkat. Selain itu adanya *damper* ganda dan variasi bukaan *damper* ganda juga akan menghasilkan *pressure drop* yang berbeda.

Sub – bab ini akan membahas tentang *pressure drop* yang terjadi pada saluran berpenampang bujursangkar dengan *elbow* 90° dan *damper* ganda dengan fungsi *Reynolds number*. Pada eksperimen ini, *pressure drop* didapatkan dari data perbedaan tekanan dari *pressure tap inlet upstream straight channel* dan *pressure tap outlet* yang terdapat pada *downstream straight channel* dengan jarak  $16D_h$  dari *oulet elbow* 90°.

Variasi bukaan yang digunakan untuk mengamati *pressure drop* pada aliran adalah tanpa *damper* dan sudut bukaan *damper* ganda 0°, sudut bukaan *damper* ganda 10°, 20°, 30° yang membentuk *nozzle* dan membentuk *diffusor*. Sedangkan untuk variasi *Reynolds number* yang digunakan  $3,94 \times 10^4 < Re_{Dh} < 10^5$  yaitu kecepatan udara 5 m/s sampai 12 m/s dengan kenaikan kecepatan 1 m/s pada masing – masing bukaan.



**Gambar 4.10** Grafik  $C_p$  yang diperoleh pada variasi bukaan damper ganda yang membentuk nozzle dan diffusor pada variasi Reynolds number  $3,94 \times 10^4 < Re_{Dh} < 10^5$

Gambar 4.10 merupakan grafik *pressure coefficient* yang diperoleh pada masing – masing bukaan *damper* ganda dengan variasi *Reynolds number*. Dapat dilihat pada grafik bahwa masing – masing bukaan *damper* ganda memiliki nilai *pressure coefficient* yang berbeda- beda. Semakin meningkatnya *Reynolds number* (kecepatan fluida) didapat nilai *pressure coefficient* konstan pada tiap bukaan *damper* ganda. Bukaan *damper* ganda sangat berpengaruh pada *pressure coefficient* yang dihasilkan dimana semakin besar bukaan *damper* ganda akan semakin besar nilai *pressure coefficient*. Nilai *pressure coefficient* ditentukan oleh *pressure drop* yang terjadi pada instalasi sesuai dengan bukaan *damper* ganda yang dipengaruhi oleh separasi dan *secondary flow* seperti yang telah dijelaskan diatas. *Pressure drop* yang terjadi pada instalasi dapat dirumuskan sesuai dengan rumus berikut ini :



$$\frac{P_{inlet}}{\rho} + \frac{\bar{V}_{inlet}^2}{2} + gZ_{inlet} = \frac{P_{16}}{\rho} + \frac{\bar{V}_{16}^2}{2} + gZ_{16} + h_{IT} \quad (4.1)$$

$$\frac{\Delta P}{\rho} = h_{IT} = h_l + h_{lm} \quad (4.2)$$

$$\frac{\Delta P}{\rho} = \frac{\bar{V}^2}{2} \times \left( f \frac{L_{upstream}}{D_h} + f \frac{L_{downstream}}{D_h} + k_{elbow\ 90^\circ} + k_{damper} \right) \quad (4.3)$$

Sedangkan untuk menghitung  $C_p$  dapat digunakan rumus sebagai berikut :

$$C_p = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2} \rho \bar{V}^2}$$

Kecepatan yang diberikan pada posisi *inlet* adalah sama dengan posisi *outlet* pada *downstream straight channel* yaitu kecepatan 5 m/s – 12 m/s pada tiap bukaanannya. Begitu juga dengan jarak pengambilan *pressure drop* yang menggunakan *pressure tap* pada posisi tersebut. Karena kedua faktor ini sama maka didapat *pressure drop* yang terjadi pada aliran dipengaruhi oleh headloss yaitu *head loss mayor dan minor*. Dimana *headloss mayor* merupakan panjang dari saluran *ducting* yang digunakan untuk uji eksperimen dan *headloss minor* adalah *koefisien dari elbow* ditambah dengan *koefisien losses* dari tiap bukaan *damper* ganda. *Damper* sebagai bodi penghalang akan meningkatkan *pressure drop* yang dihasilkan apabila semakin besar bukaan dari *damper* tersebut karena aliran yang terhambat akan semakin besar.

Sesuai dengan gambar , grafik pada kondisi instalasi tanpa *damper* dan dengan adanya *damper* memiliki *trendline* grafik yang cenderung konstan seiring dengan kenaikan *Reynolds number* dari *Reynolds number*  $3,94 \times 10^4$  sampai dengan *Reynolds number*  $10^5$  . Pada variasi bukaan sudut  $30^\circ$  *nozzle* memiliki nilai *pressure coefficient* lebih besar yaitu 4.07 daripada nilai *pressure coefficient* yang dimiliki oleh variasi bukaan sudut  $30^\circ$  *diffusor* yaitu sebesar 3.08. Begitu juga dengan bukaan sudut  $10^\circ$  dan  $20^\circ$  bukaan *damper* ganda yang membentuk *nozzle* memiliki nilai

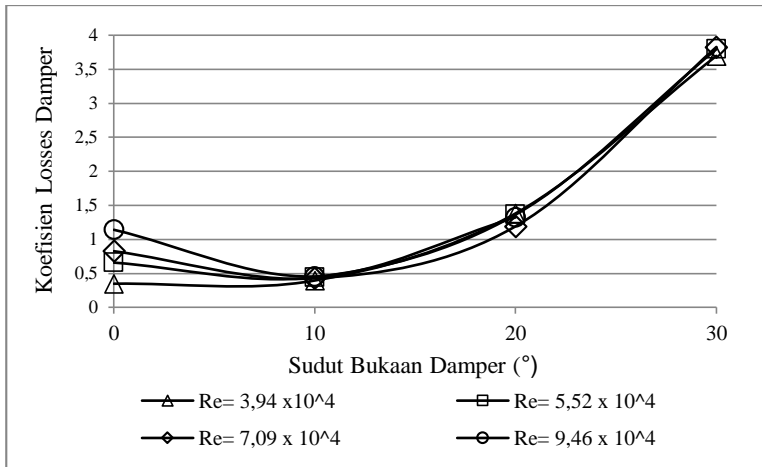
*pressure coefficient* lebih besar daripada bukaan *damper* ganda yang membentuk *diffusor*. *Pressure drop* sangat mempengaruhi nilai *pressure coefficient* yang diperoleh dimana pada bukaan *damper* ganda membentuk *nozzle* memiliki *pressure drop* yang lebih besar daripada *damper* ganda yang membentuk *diffusor*. Hal ini disebabkan oleh bukaan *nozzle* mempercepat aliran yang melewati *damper* ganda tersebut sedangkan untuk *damper* ganda dengan bukaan *diffusor* justru memperlambat aliran. Sehingga dengan bukaan sudut yang sama namun berbeda bentuk antara *nozzle* dan *diffusor*, bukaan *damper* ganda yang membentuk *nozzle* akan menghasilkan *pressure drop* yang lebih besar karena memiliki pada kecepatan aliran yang lebih besar sesuai dengan perumusan diatas.

#### 4.6.1 Koefisien Losses Damper

*Damper* atau bodi penghalang yang dipasang pada suatu instalasi akan mempengaruhi aliran yang melewatinya dan mengakibatkan *koefisien losses damper* pada saluran. *Koefisien losses damper* adalah nilai konstanta yang menentukan besar kecil *headloss minor damper* akibat pemasangan *damper*. Pada studi eksperimen ini dipasang 2 buah *damper* pada jarak  $2D_h$  dari *outlet elbow 90* dengan *koefisien losses damper* didapatkan dari data perbedaan tekanan dari *pressure tap inlet* sebelum *damper (section -1)* dan sesudah *damper (section 1)* yang terdapat pada *downstream straight channel*. Variasi sudut bukaan *damper* ganda yang dilakukan adalah  $0^\circ$ , sudut bukaan *damper* ganda  $10^\circ$ ,  $20^\circ$  dan  $30^\circ$  membentuk *nozzle* dan sudut bukaan *damper* ganda  $10^\circ$ ,  $20^\circ$  dan  $30^\circ$  membentuk *diffusor*. *Koefisien losses damper* akan diambil dengan variasi *Reynolds number*  $3,94 \times 10^4 < Re_{Dh} < 9,46 \times 10^4$  (kecepatan udara 5 m/s sampai 12 m/s) yang secara keseluruhan grafiknya dapat dilihat pada lampiran.

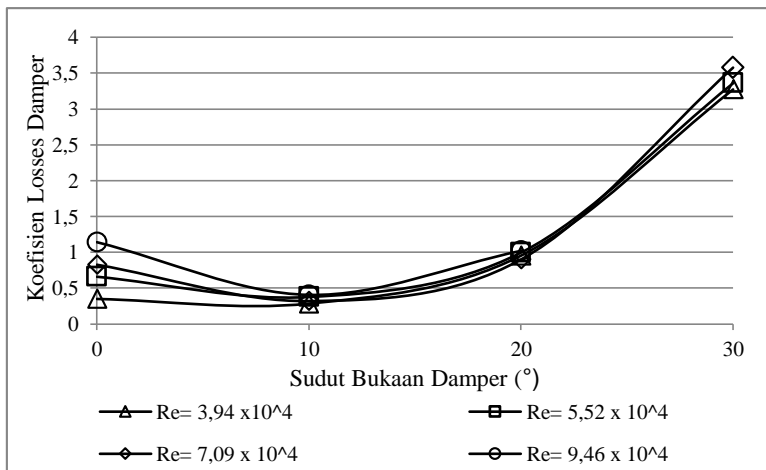
Selanjutnya akan ditampilkan dan dijelaskan karakteristik *koefisien losses damper* pada *square duct* dengan

*square elbow 90°*. Terdapat 2 grafik yang akan dibahas yaitu grafik dari nilai *koefisien losses damper* fungsi variasi sudut bukaan *damper* ganda  $0^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $20^\circ$  dan  $30^\circ$  yang membentuk *nozzle* dengan variasi *Reynolds number*  $3.94 \times 10^4$ ,  $5.52 \times 10^4$ ,  $7.09 \times 10^4$  dan  $9.46 \times 10^4$  pada kecepatan udara 5 m/s, 7m/s, 9m/s dan 12 m/s ditunjukkan pada gambar 4.16 dan grafik dari nilai *koefisien losses damper* fungsi variasi sudut bukaan *damper* ganda  $0^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $20^\circ$  dan  $30^\circ$  yang membentuk *diffusor* dengan variasi *Reynolds number* yang sama dengan variasi bukaan *nozzle* yang ditunjukkan gambar 4.11.



**Gambar 4.11.** *Koefisien losses damper* fungsi variasi *Reynolds number* dengan variasi sudut bukaan *damper*  $0^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $20^\circ$  dan  $30^\circ$  membentuk *nozzle*

Dari gambar 4.11. merupakan nilai *koefisien losses* pada variasi bukaan *damper* ganda yang membentuk *nozzle*. Pada sudut bukaan *damper* ganda  $0^\circ$  *Reynolds number*  $3,94 \times 10^4$  memiliki *koefisien losses damper* paling kecil yaitu terletak pada nilai 0.3486 dan memiliki *koefisien losses damper* paling tinggi saat *Reynolds number*  $9,46 \times 10^4$  dengan nilai 1.141. Grafik mengalami penurunan pada bukaan  $10^\circ$  *nozzle* dimana pada tiap variasi *Reynolds number* *koefisien losses damper* terlihat berada pada satu titik dan pada *Reynolds number*  $9,46 \times 10^4$  memiliki nilai 0.4554. Selanjutnya *trendline* grafik terus meningkat seiring dengan besarnya bukaan sudut *damper* ganda yang membentuk *nozzle* dimana *koefisien losses damper* terbesar didapat pada saat bukaan *damper* ganda  $30^\circ$  membentuk *nozzle*. Pada bukaan sudut *damper* ganda  $30^\circ$  diperoleh nilai *koefisien losses damper* terbesar pada *Reynolds number*  $7,09 \times 10^4$  yaitu 3.872. Dapat dilihat bahwa semakin meningkatnya *Reynolds number* maka akan semakin meningkat pula nilai *koefisien losses damper* yang terjadi pada masing-masing sudut bukaan *damper*.



**Gambar 4.12.** *Koefisien losses damper* fungsi variasi *Reynolds number* dengan variasi sudut bukaan *damper*  $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ$  dan  $30^\circ$  membentuk *diffusor*

Dari gambar 4.12. merupakan nilai *koefisien losses* pada variasi bukaan *damper* ganda yang membentuk *diffusor*. Pada sudut bukaan *damper* ganda  $0^\circ$  *Reynolds number*  $3,94 \times 10^4$  memiliki *koefisien loss damper* pada nilai 0.3486 dan memiliki *koefisien losses* paling tinggi saat *Reynolds number*  $9,46 \times 10^4$  dengan nilai 1.141. Grafik mengalami penurunan pada bukaan  $10^\circ$  *diffusor* dimana tiap variasi *Reynolds number*, *koefisien losses damper* terlihat berada pada satu titik dan *koefisien losses damper* paling kecil terdapat saat *Reynolds number*  $3,94 \times 10^4$  dengan nilai 0.295 sedangkan pada *Reynolds number*  $9,46 \times 10^4$  memiliki nilai 0.405. Pada bukaan  $10^\circ$  *diffusor* memiliki kenaikan *koefisien losses damper* yang sangat kecil dan tidak terlalu signifikan. Selanjutnya *trendline* grafik terus meningkat seiring dengan besarnya bukaan sudut *damper* ganda yang membentuk *diffusor* dimana *koefisien losses damper* terbesar didapat pada saat bukaan *damper* ganda  $30^\circ$  membentuk pada *Reynolds number*  $7,09 \times 10^4$  yaitu 3.57.

Dapat dilihat bahwa semakin meningkatnya *Reynolds number* maka akan semakin meningkat pula nilai *koefisien losses damper* yang terjadi pada masing-masing sudut bukaan *damper*. Sehingga dapat dikatakan jika kecepatan dari suatu fluida meningkat, maka *koefisien losses damper* akan meningkat. Hal ini dapat disebabkan oleh *headloss minor* yang semakin besar, sesuai dengan perumusan sebagai berikut :

$$\frac{P_3}{\rho} + \frac{\bar{V}_3^2}{2} + gZ_3 = \frac{P_2}{\rho} + \frac{\bar{V}_2^2}{2} + gZ_2 + h_{lm} \quad (4.4)$$

$$\frac{\Delta P}{\rho} = h_{damper} \quad (4.5)$$

$$\frac{\Delta P}{\rho} = k_{damper} \left( \frac{\bar{V}^2}{2} \right) \quad (4.6)$$

$$k_{damper} = \frac{2 \cdot \Delta P}{\rho \cdot \bar{V}^2} \quad (4.7)$$

Terdapat perbedaan *koefisien losses damper* yang diperoleh dari dua macam bentuk bukaan yaitu bukaan sudut  $10^\circ$ ,  $20^\circ$  dan  $30^\circ$  yang membentuk *nozzle* dan bukaan sudut  $10^\circ$ ,  $20^\circ$  dan  $30^\circ$  yang membentuk *diffusor* dengan variasi *Reynolds number* yang sama. Terlihat pada masing – masing grafik bukaan yang membentuk *nozzle* memiliki nilai *koefisien losses damper* yang lebih besar daripada *koefisien losses damper* pada *diffusor*. Pada bukaan sudut *damper* ganda  $30^\circ$  dengan *Reynolds number*  $3,94 \times 10^4$  (kecepatan 5 m/s) yang membentuk *diffusor* memiliki nilai 3.272 sedangkan untuk bukaan yang membentuk *nozzle* memiliki nilai 3.696. Pada *Reynolds number*  $7,09 \times 10^4$  untuk bukaan sudut  $30^\circ$  membentuk *diffusor* memiliki nilai 3.57 sedangkan untuk bukaan yang membentuk *nozzle* memiliki nilai *koefisien losses damper* 3.872. Hal ini dapat disimpulkan bahwa untuk bukaan *nozzle* memiliki *koefisien losses damper* yang lebih besar daripada bukaan *damper* ganda yang membentuk *diffusor* dikarenakan aliran saat melewati *damper* berbentuk *nozzle* akan mengalami percepatan aliran karena perbedaan luas penampang input dan output. Pada bukaan *damper* dengan bentuk *diffusor* aliran yang masuk memiliki penampang kecil sedangkan aliran yang keluar memiliki penampang yang lebih besar dan mengakibatkan aliran lebih lambat bila dibandingkan dengan aliran yang melewati bentuk *nozzle*.

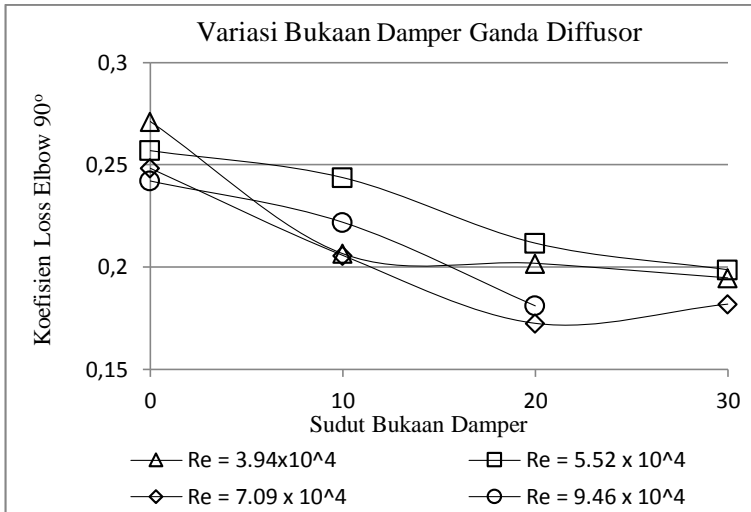
Besarnya *koefisien losses damper* yang dihasilkan sangat berpengaruh dengan besarnya *pressure drop* pada aliran. Seperti yang telah dibahas pada bab diatas bahwa bukaan *nozzle* memiliki *pressure drop* yang lebih besar daripada bukaan *diffusor* yang salah satunya disebabkan oleh lebih besarnya *koefisien losses* pada bukaan *damper* yang membentuk *nozzle*. Dengan melakukan perbandingan antara kedua bentuk bukaan dengan sudut yang sama dapat diperoleh informasi bahwa bentuk bukaan sudut dari *damper* ganda mempunyai pengaruh pada fenomena aliran yang terjadi pada instalasi. Sesuai dengan perumusan 4.7, yaitu ketika kecepatan aliran yang melintasi saluran meningkat maka nilai *koefisien losses damper* akan meningkat. Dari seluruh

variasi *Reynolds number*, dapat dilihat bahwa pada *Reynolds number*  $3,94 \times 10^4$  memiliki nilai *koefisien losses damper* paling rendah pada setiap variasi sudut bukaan *damper*.

#### 4.6.2 Koefisien Losses Elbow 90°

Studi Eksperimen yang dilakukan menggunakan *elbow* 90° yang memiliki penampang bujursangkar (*square*) sesuai dengan penampang *ducting*. Pemasangan *elbow* 90° akan mengakibatkan *koefisien losses elbow* 90° pada saluran. *Koefisien losses elbow* 90° adalah nilai konstanta yang menentukan besar kecil *head loss minor elbow* 90° akibat pemasangan sebuah *elbow* 90°. Pada eksperimen ini, *koefisien losses elbow* 90° didapatkan dari data perbedaan tekanan dari *pressure tap inlet elbow* 90° dan *pressure tap outlet elbow* 90° (*section -1*) yang terdapat pada *downstream straight channel*.

Pengambilan data dilakukan sesuai dengan bukaan *damper* ganda yang membentuk *nozzle* dan *diffusor* dengan variasi bukaan sudut 10°, 20° dan 30° serta *damper* ganda dengan bukaan sudut 0° dengan variasi *Reynolds number*. Terdapat 2 grafik menggambarkan *koefisien losses elbow* 90° sesuai dengan masing – masing bentuk variasi bukaan sudut. Selanjutnya akan ditampilkan dan dijelaskan karakteristik *koefisien losses elbow* 90° pada *square duct* dengan *square elbow* 90°. variasi *Reynolds number*  $3,94 \times 10^4 < Re_{Dh} < 9,46 \times 10^4$  (kecepatan udara 5 m/s sampai 12 m/s dengan kenaikan kecepatan 1 m/s) yang diletakkan pada lampiran. Pada gambar 4.13 akan ditampilkan grafik *koefisien losses elbow* 90° pada variasi *Reynolds number* terbesar dan terkecil serta diantaranya yaitu pada saat kecepatan 5 m/s, 7 m/s, 9 m/s dan 12 m/s untuk *damper* ganda yang membentuk *diffusor* dan gambar 4.14 untuk *damper* ganda yang membentuk *nozzle* dengan variasi *Reynolds number* yang sama

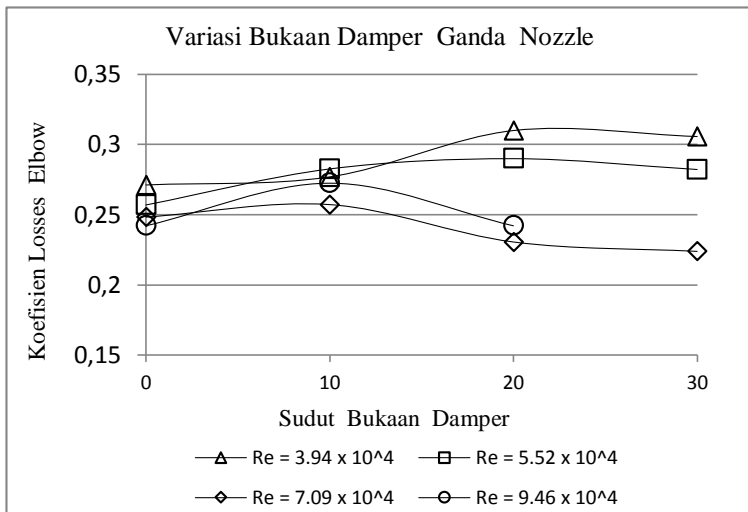


**Gambar 4.13.** Koefisien losses elbow  $90^\circ$  variasi sudut bukan dampier  $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ$  dan  $30^\circ$  diffusor dengan variasi Reynolds number

Pada grafik gambar 4.13. dapat dilihat bahwa dengan adanya elbow  $90^\circ$  menghasilkan nilai koefisien losses elbow  $90^\circ$  dengan nilai yang berbeda – beda pada variasi bukan sudut dampier ganda dan variasi Reynolds number. Grafik yang diperoleh pada variasi bukan dampier ganda yang membentuk diffusor memiliki trendline yang fluktuatif dan cenderung menurun. Pada saat bukan dampier ganda  $0^\circ$  koefisien elbow  $90^\circ$  paling besar terdapat saat Reynolds number  $3.94 \times 10^4$  dan koefisien elbow paling kecil terdapat pada Reynolds number  $9.46 \times 10^4$ . Pengaruh dari bukan dampier sangat berpengaruh dimana grafik semakin menurun dengan semakin besarnya bukan sudut dampier ganda. Bukan dampier ganda yang membentuk diffusor dengan sudut  $30^\circ$  memiliki koefisien losses elbow  $90^\circ$  paling rendah. Meningkatnya Reynolds number memiliki pengaruh pada koefisien losses elbow seperti yang terlihat pada saat bukan  $30^\circ$  diffusor dimana koefisien losses elbow paling tinggi didapat pada



saat *Reynolds number*  $5.52 \times 10^4$  dan *koefisien losses elbow* paling rendah didapat pada saat *Reynolds number*  $7.09 \times 10^4$ . Untuk bukaan damper ganda dengan sudut  $30^\circ$  kecepatan hanya sampai 11 m/s, sehingga tidak bisa dilihat perbandingan pada kecepatan 12 m/s atau pada *Reynolds number*  $9.46 \times 10^4$ . Bukaan *damper* yang membentuk *diffusor* ini kemungkinan menjadi pengaruh yang besar terhadap grafik yang fluktuatif.



**Gambar 4.14.** *Koefisien losses elbow 90° variasi sudut bukaan damper 0°, 10°, 20° dan 30° nozzle dengan variasi Reynolds number*

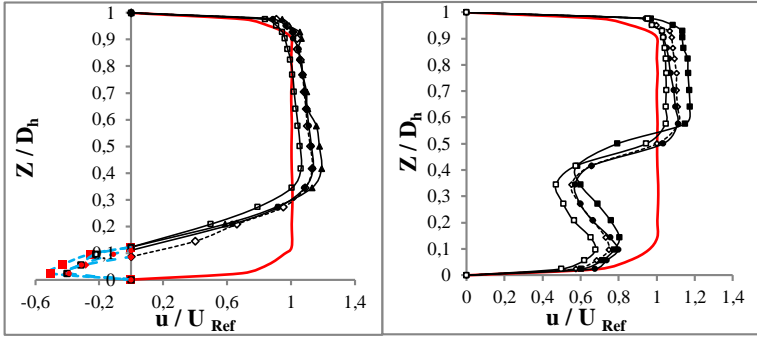
Gambar 4.14 merupakan grafik dari *koefisien losses elbow 90°* dari variasi bukaan *damper* ganda yang membentuk *nozzle* dengan variasi *Reynolds number*  $3.94 \times 10^4$ ,  $5.52 \times 10^4$ ,  $7.09 \times 10^4$ , dan  $9.46 \times 10^4$  yaitu kecepatan 5 m/s, 7 m/s, 9 m/s dan 12 m/s. Dapat dilihat dari gambar diatas bahwa *trendline* grafik yang dimiliki oleh bukaan *damper* ganda yang membentuk *nozzle* terlihat fluktuatif dan cenderung meningkat. Pada saat bukaan

damper ganda  $0^\circ$  sama dengan pembahasan diatas dimana pada saat *Reynolds number*  $3.94 \times 10^4$  memiliki *koefisien losses elbow* paling tinggi. Selanjutnya pada saat sudut bukaan damper ganda  $10^\circ$  *trendline* grafik meningkat pada semua variasi *Reynolds number* . Pada saat bukaan damper ganda  $20^\circ$  *trendline* grafik mengalami penurunan pada *Reynolds number*  $7.09 \times 10^4$  dan  $9.46 \times 10^4$  dimana *koefisien losses elbow*  $90^\circ$  paling kecil didapat pada saat *Reynolds number*  $7.09 \times 10^4$  sebesar 0.23. Pada bukaan sudut damper ganda  $30^\circ$  membentuk *nozzle* terlihat *koefisien losses elbow* semakin turun seiring bertambahnya *Reynolds number* dimana pada *Reynolds number*  $3.94 \times 10^4$  memiliki *koefisien losses elbow* yang paling besar yaitu 0.305 dan semakin kecil dengan bertambahnya *Reynolds number* pada  $9.46 \times 10^4$  yang memiliki *koefisien losses elbow*  $90^\circ$  paling kecil yaitu 0.23. *Reynolds number* dan bukaan sudut yang dibentuk damper sangat berpengaruh terhadap karakteristik dan *koefisien losses* yang terjadi di dalam *ducting*. Semakin meningkatnya *Reynolds number* maka semakin kecil *koefisien losses elbow*  $90^\circ$  yang terjadi pada aliran seperti ditunjukkan pada gambar grafik 4.12

Perbandingan *koefisien losses elbow*  $90^\circ$  antara bukaan *diffusor* dan *nozzle* terlihat dari gambar 4.13 dan gambar 4.14 dimana saat damper ganda membentuk *diffusor trendline* cenderung menurun sedangkan pada saat bukaan damper ganda yang membentuk *nozzle trendline* grafik cenderung meningkat. Secara keseluruhan *koefisien losses elbow* pada *nozzle* memiliki nilai yang lebih tinggi daripada *koefisien losses elbow*  $90^\circ$  pada *diffusor*. Sehingga dapat ditarik kesimpulan bahwa bukaan damper ganda sangat berpengaruh terhadap *koefisien losses elbow*  $90^\circ$

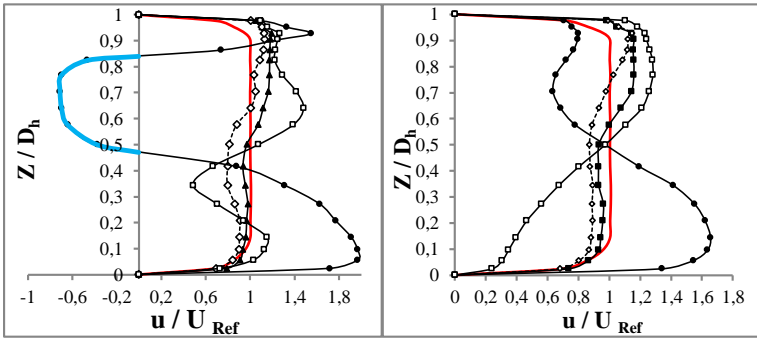
*(Halaman ini sengaja dikosongkan )*

**LAMPIRAN I. Profil Kecepatan Bidang Horizontal pada**  
 $Re_{Dh} = 7,88 \times 10^4$



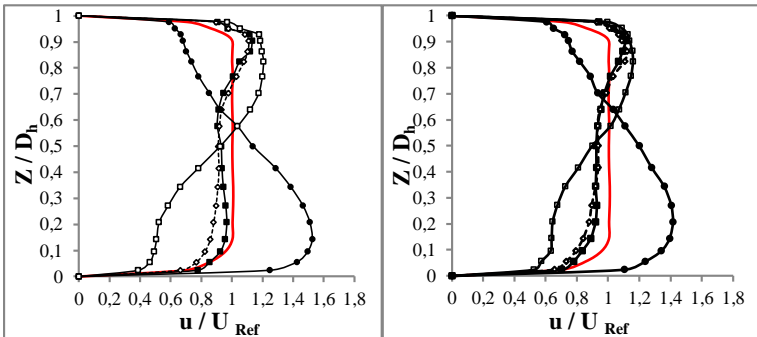
(a) Section -2 ( $x/D_h = 1$ )

(b) Section -1 ( $x/D_h = 2$ )



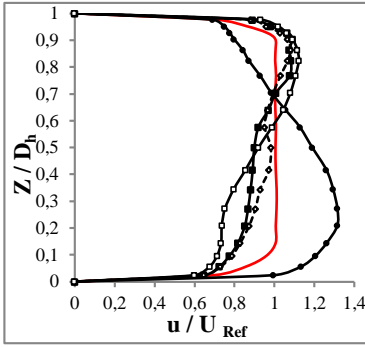
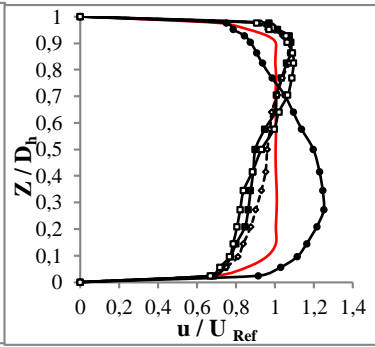
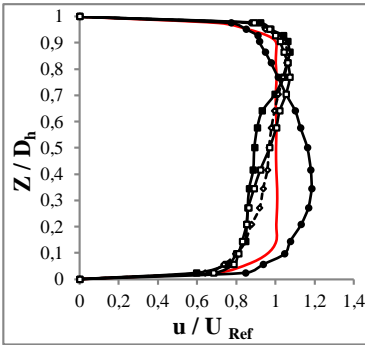
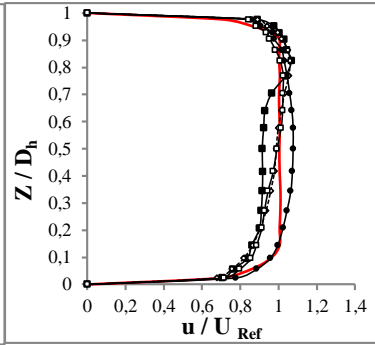
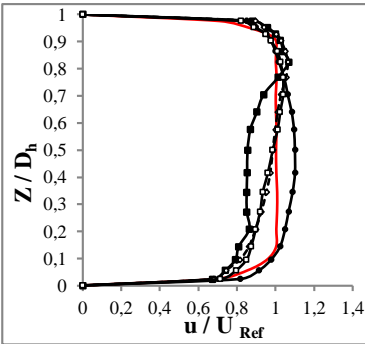
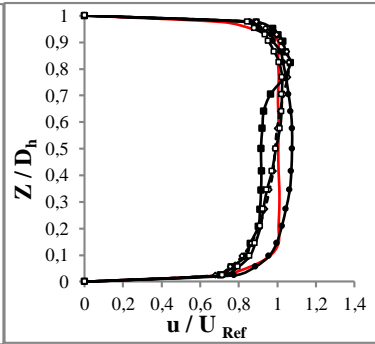
(c) Section 1 ( $x/D_h = 3$ )

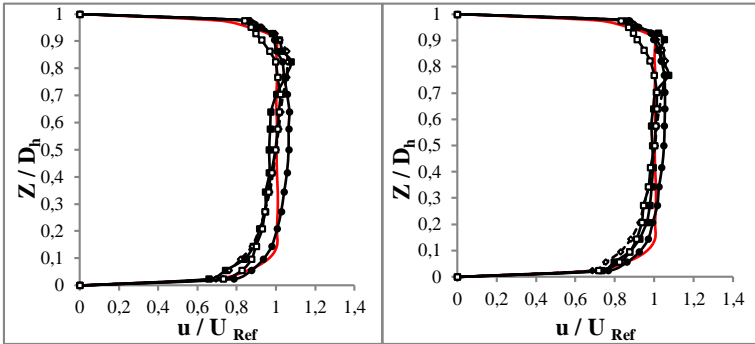
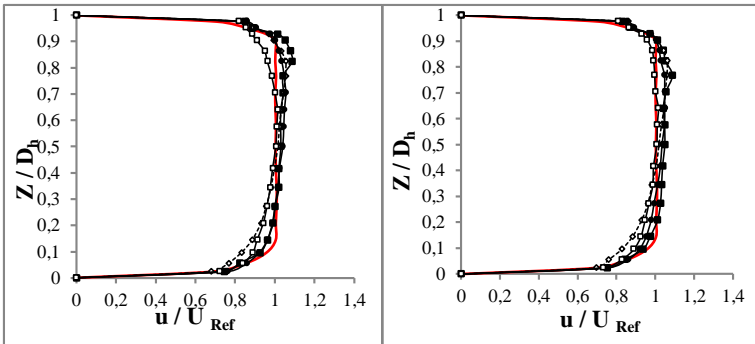
(d) Section 2 ( $x/D_h = 4$ )



(f) Section 3 ( $x/D_h = 5$ )

(e) Section 4 ( $x/D_h = 6$ )

(h) Section 5 ( $x/D_h = 7$ )(g) Section 6 ( $x/D_h = 8$ )(j) Section 7 ( $x/D_h = 9$ )(i) Section 8 ( $x/D_h = 10$ )(l) Section 9 ( $x/D_h = 11$ )(k) Section 10 ( $x/D_h = 12$ )

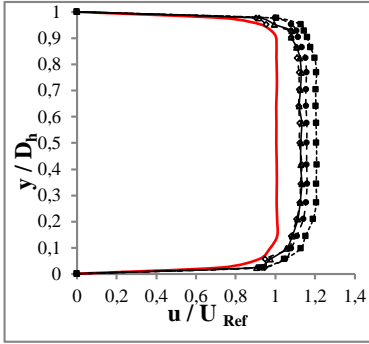
(n) Section 11 ( $x/D_h = 13$ )(m) Section 12 ( $x/D_h = 14$ )(o) Section 13 ( $x/D_h = 15$ )(p) Section 14 ( $x/D_h = 16$ )

Keterangan Gambar :

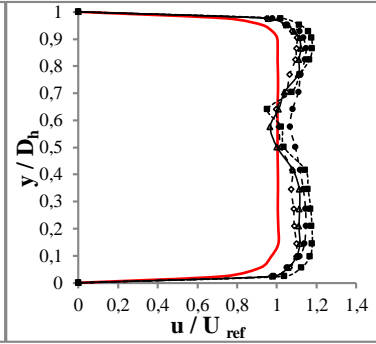
- Sisi Upstream
- Tanpa Damper
- ◇--- Sudut Damper 0 Derajat
- Sudut Damper 30 Derajat Diffusor
- Sudut Damper 30 Derajat Nozzle
- Estimasi nilai backflow

## LAMPIRAN II. Profil Kecepatan Bidang Vertikal pada

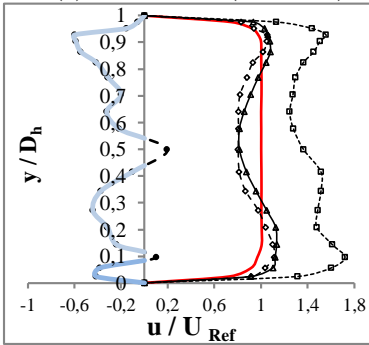
$Re_{Dh} = 7,88 \times 10^4$



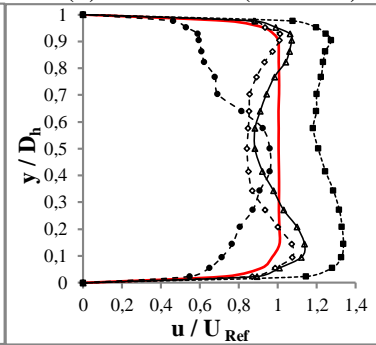
(a). Section -2 ( $x/D_h = 1$ )



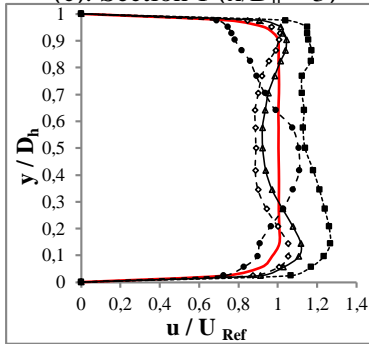
(b). Section -1 ( $x/D_h = 2$ )



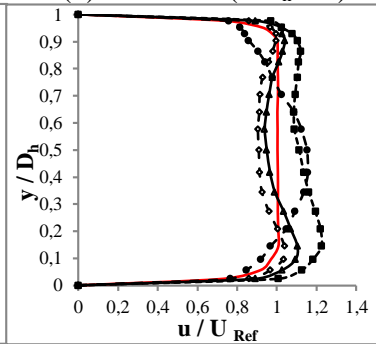
(c). Section 1 ( $x/D_h = 3$ )



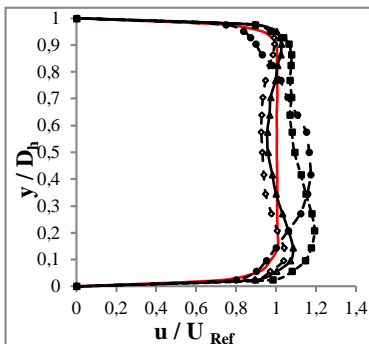
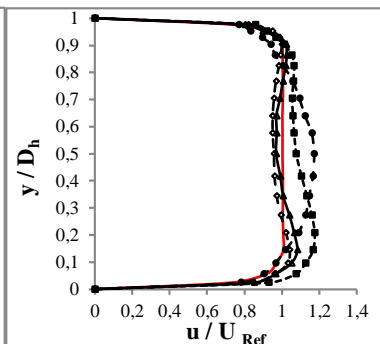
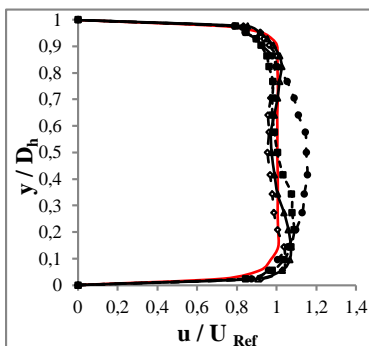
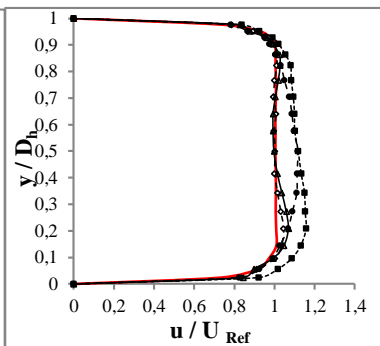
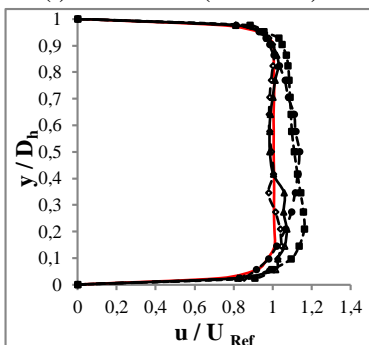
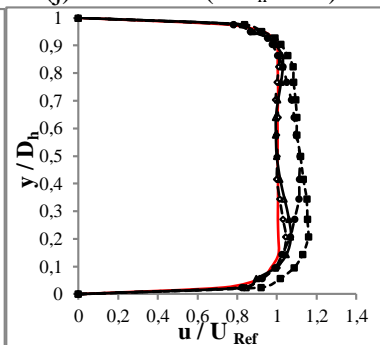
(d). Section 2 ( $x/D_h = 4$ )



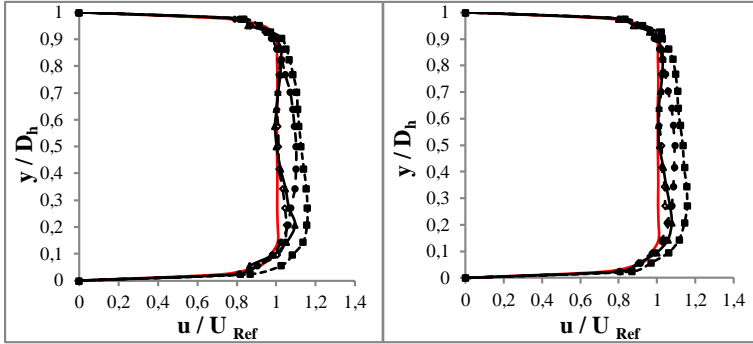
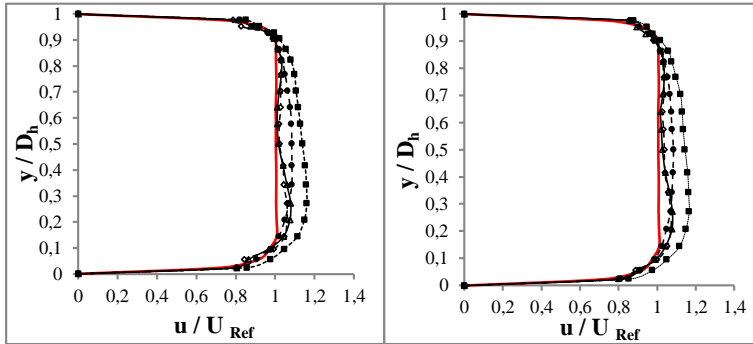
(e). Section 3 ( $x/D_h = 5$ )



(f). Section 4 ( $x/D_h = 6$ )

(g). Section 5 ( $x/D_h = 7$ )(h). Section 6 ( $x/D_h = 8$ )(i). Section 7 ( $x/D_h = 9$ )(j). Section 8 ( $x/D_h = 10$ )(k). Section 9 ( $x/D_h = 11$ )(l). Section 10 ( $x/D_h = 12$ )

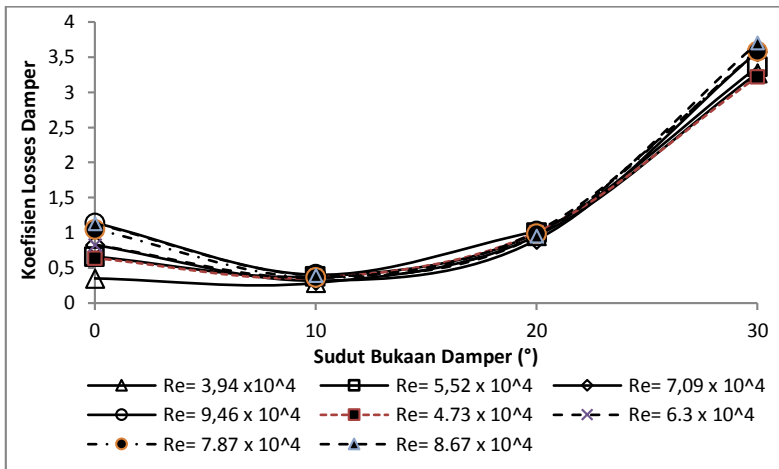
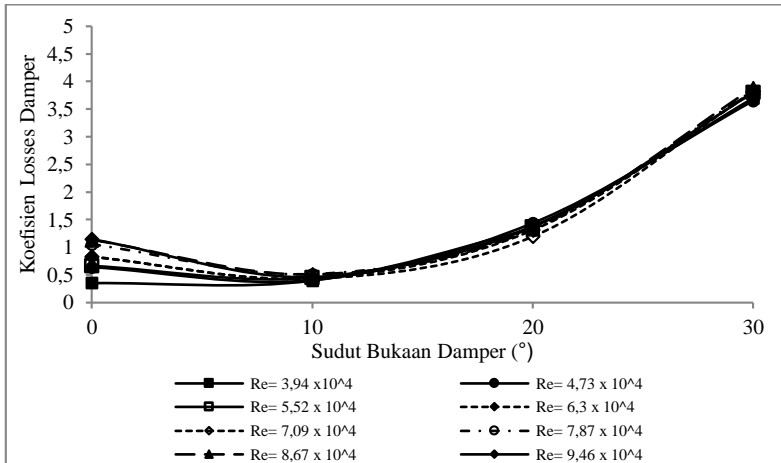


(m). Section 11 ( $x/D_h = 13$ )(n). Section 12 ( $x/D_h = 14$ )(o). Section 13 ( $x/D_h = 15$ )(p). Section 14 ( $x/D_h = 16$ )

Keterangan Gambar :

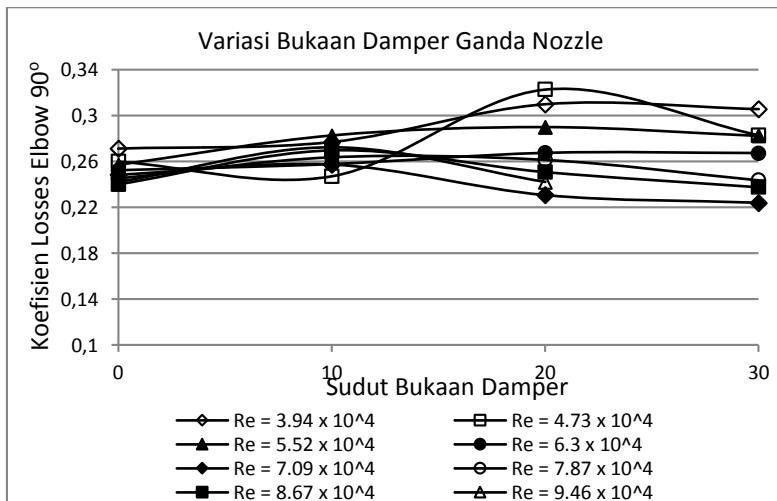
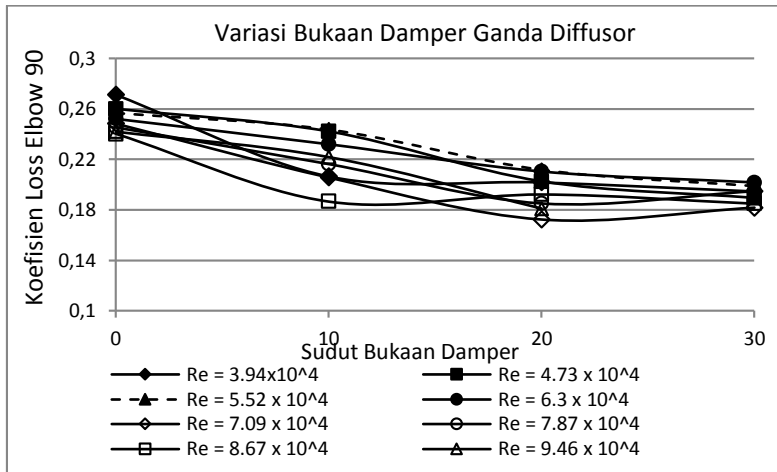
- Sisi Upstream
- ◇-- Tanpa Damper
- △— Sudut Damper 0 Derajat
- Sudut Damper 30 Derajat Diffusor
- Sudut Damper 30 Derajat Nozzle
- Estimasi nilai backflow

### Koefisien Losses Damper



Koefisien losses damper fungsi variasi Reynolds number  $3.94 \times 10^4 < Re_{Dh} < 9.46 \times 10^4$  dengan variasi sudut bukaan damper  $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ$  dan  $30^\circ$  nozzle (atas) dan diffusor (bawah)

### Koefisien losses elbow 90°



Koefisien losses elbow 90° fungsi variasi Reynolds number  $3,94 \times 10^4 < Re_{Dh} < 9.46 \times 10^4$  dengan variasi sudut bukaan damper 0°, 10°, 20° dan 30° diffusor (bawah) dan nozzle (bawah)

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1. Kesimpulan

Dari hasil penelitian yang telah dibahas pada bab analisa dan pembahasan dapat di ambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Variasi *Reynolds number* dan variasi bentuk dan sudut bukaan *damper* ganda sangat mempengaruhi fenomena aliran diantaranya profil kecepatan aliran baik pada bidang vertikal dan horizontal, nilai *pressure coefficient* , koefisien *losses elbow 90°* dan koefisien *losses damper*
2. Pembentukan *backflow* akibat adanya daerah separasi terjadi pada saluran tanpa *damper*, sudut bukaan *damper* ganda  $0^\circ$ , sudut bukaan *damper* ganda  $30^\circ$  *nozzle* dan sudut bukaan *damper* ganda  $30^\circ$  *diffusor* pada sisi *inner outlet elbow 90°*. *Backflow* pada sisi *inner outlet elbow 90°* tertinggi terjadi pada saluran tanpa *damper*
3. Proses *recovery* aliran pada sudut bukaan *damper* ganda  $30^\circ$  *nozzle* lebih baik jika di banding variasi tanpa *damper*, sudut bukaan *damper* ganda  $0^\circ$ , dan sudut bukaan *damper* ganda  $30^\circ$  *diffusor* setelah jarak  $16D_h$  dari *outlet elbow 90°*.
4. Nilai *pressure coefficient* yang paling besar didapat pada variasi bukaan *damper* ganda  $30^\circ$  *nozzle* dan paling rendah didapat pada variasi tanpa *damper*. Semakin meningkatnya *Reynolds number*, *pressure coefficient* pada setiap sudut bukaan *damper* ganda juga akan semakin meningkat.
5. Pemasangan *elbow 90°* akan mengakibatkan koefisien *losses elbow 90°* pada saluran.. Koefisien *losses elbow 90°* pada variasi bukaan *damper* ganda berbentuk *nozzle* memiliki nilai lebih besar dari bukaan *damper* ganda yang berbentuk *diffusor*.
6. Koefisien *losses damper* pada variasi bukaan *damper* ganda berbentuk *nozzle* memiliki nilai yang lebih besar daripada variasi bukaan *damper* ganda berbentuk *diffusor*. Nilai koefisien *losses damper* paling besar didapat pada variasi

bukaan *damper* ganda 30° *nozzle* pada *Reynolds number*  $8.67 \times 10^4$  dengan nilai 3.878 sedangkan pada *Reynolds number* yang sama variasi bukaan *damper* ganda 30° *diffusor* memiliki nilai 3.702.

## 5.2 Saran

Adapun saran yang diperlukan untuk kedepannya adalah sebagai berikut :

1. Peralatan yang berkualitas dan akurat sangat diperlukan untuk memperoleh hasil data yang baik. Sehingga harus dilakukan perawatan alat ukur dan komponen yang mendukung
2. Pengambilan data harus pada kondisi ruangan yang stabil karena mempengaruhi kevalidan data yang didapat.
3. Diperlukan adanya kajian eksperimen dengan variasi penempatan *damper* ganda pada jarak  $D_h$  dari *outlet elbow* 90° dan jumlah *damper* agar dapat dibandingkan hasil eksperimen fenomena aliran yang terjadi dengan pengaruh dari variasi tersebut.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Cheng, D.Y. 1994. **Laminar Flow Elbow System and Method.** U.s. Patent Documents, No. 5,323,661.
2. Danbon, F. dan Sollicec, C. 2000. **Aerodynamic Torque of a Butterfly Valve-Influence of an Elbow on the Time-Mean and Instantaneous Aerodynamic Torque.** Nantes: Ecole des Mines de Nantes, Département Systèmes.
3. Edo, Edgar S.P . 2016. **Simulasi Numerik Aliran Tiga Dimensi Melalui Rectangular Duct dengan Variasi Bukaam Damper.** Tugas Akhir. Teknik Mesin ITS Surabaya.
4. Fox, R.W., Mc Donald, A.T. dan Pritchard, P.J. 1998. **Introduction to Fluid Mechanics, 7<sup>th</sup> edition.** New York: John Wiley and Sons.
5. Idel'chick, I.E. 1960. **Handbook of Hydraulic Resistance.** Gosudarstvennoe Energeticheskoe Izdatel'stvo : Moskva-Leningrad.
6. Kimura, Takeyoshi Dkk, 1995. **Hydrodynamic Characteristics of a Butterfly Valve – Prediction of Pressure Loss Characteristics.** Kobe University, Faculty of Engineering, Kobe Japan.
7. Miller, D.S. 1990. **Internal Flow System, 2<sup>nd</sup> edition.** Bedford: BHRA
8. Rup, K., dan Sarna, P. 2011. **Analysis of Turbulent Flow Through a Square-Sectioned Duct with Installed 90-degree Elbow.** Cracow: Elsevier.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Madiun, 08 Februari 1993, merupakan anak kedua dari dua bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal yaitu, SDN Manisrejo 05 Madiun, SMPN 1 Madiun, dan SMAN 2 Madiun. Pada tahun 2011 Penulis diterima di Jurusan D3 Teknik Mesin FTI – ITS dan terdaftar sebagai mahasiswa dengan NRP 2111 030 043. Konversi Energi merupakan bidang studi yang dipilih penulis dalam pengerjaan Tugas Akhir. Setelah lulus dari D3 Teknik Mesin ITS Surabaya penulis melanjutkan jenjang lintas jalur S1 Teknik Mesin pada tahun 2014 sampai dengan tahun 2016

Selama duduk di bangku kuliah penulis aktif mengikuti kegiatan baik di bidang akademik maupun non akademik. Penulis juga pernah mengikuti berbagai kegiatan untuk menunjang softskill. Kegiatan yang pernah diikutinya antara lain : Pelatihan LKMM Pra TD, Pelatihan LKMM TD, Pelatihan Jurnalistik Dasar, Pelatihan Motor Bakar dan menjadi peserta dan panitia pada acara institut. Penulis juga pernah melaksanakan kerja Praktek di Petrokimia Gresik selama satu bulan pada 01 Juli s/d 31 Juli 2013 di bidang *Rancang Bangun dan Maintenance* pada Pabrik 1 Petrokimia Gresik.